

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

LE GISEMENT AURIFÈRE PÉRI-GRANITIQUE DE CANADIAN MALARTIC  
(QUEBEC) : APPORT DE LA MODÉLISATION 3D À L'INTERPRÉTATION  
MÉTALLOGÉNIQUE

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR  
CHRISTIAN BEAULIEU

JANVIER 2010

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PERIGRANITIC GOLD DEPOSIT OF CANADIAN MALARTIC (QUEBEC): 3D  
MODELING CONTRIBUTION TO METALLOGENIC INTERPRETATION

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR  
CHRISTIAN BEAULIEU

JANVIER 2010

# UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

Service des bibliothèques

## Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 -Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## AVANT-PROPOS

Le présent mémoire a été rédigé sous la forme d'un article scientifique, dans le but d'être soumis à la revue *Mineralium Deposita* (Pergamon) sous le titre: *Perigranitic gold deposit of Canadian Malartic (Quebec): 3D modeling contribution to metallogenic interpretation*. Par conséquent, les figures et tableaux se trouvent à la fin de l'article. Deux autres auteurs ont participé à la rédaction de l'article ; Michel Jébrak, mon directeur de maîtrise et Robert Wares, géologue et directeur de la Corporation Minière Osisko. Le format de mémoire a été choisi dans le but de rejoindre la communauté scientifique à plus grande échelle, dans un esprit de partage des connaissances et d'avancement de la science. De plus, la langue de rédaction représente un défi additionnel quant à l'accomplissement de la maîtrise.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de maîtrise, Michel Jébrak, pour son support constant tout au long du projet. Ses multiples idées, conseils et encouragements ont toujours réussi à me redonner confiance.

De nombreuses personnes ont contribué à ce que ce projet de recherche aboutisse. Un gros merci aux géologues du Groupe-Conseil Cygnus, avec qui les discussions furent fort enrichissantes; à mes collègues de McGill, Ana Guerra, Jim Clark et A.E. William-Jones; à Olivier Rabeau pour ses conseils sur gOcad; et plus particulièrement à Robert Wares de la Corporation Minière Osisko sans qui ce projet ne serait pas ce qu'il est devenu. Un merci aussi aux collègues et amis du labo, Guillaume, Raphaël, Baptiste, Geneviève et Sylvain pour toutes les discussions qui n'avaient pas nécessairement rapport à la géologie.

Enfin, un merci très particulier à ma copine Jessie, qui a su me supporter et m'endurer pendant tout ce temps, ainsi qu'à mes parents, Cécile et Gilbert, et ma sœur, Isabelle pour leur soutien inconditionnel. Une dernière vague de remerciements à mes

amis(es), sans qui je n'aurais pu passer au travers : Annie, Vincent, Philippe, Annie-Claude, Audrey, et beaucoup d'autres.

## TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS .....	iii
LISTE DES FIGURES .....	v
LISTE DES TABLEAUX .....	vi
RÉSUMÉ .....	vii
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
PERIGRANITIC GOLD DEPOSIT OF CANADIAN MALARTIC (QUEBEC): 3D MODELING CONTRIBUTION TO METALLOGENIC INTERPRETATION .....	5
CONCLUSION GÉNÉRALE .....	42
APPENDICE A .....	44
APPENDICE B .....	55
APPENDICE C .....	67
APPENDICE D .....	70
APPENDICE E .....	93

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Regional geology of the South-eastern Superior Province.....	29
Figure 2. Geological and alteration map of the Canadian Malartic Property.....	30
Figure 3. Three-dimensional geometry of the Canadian Malartic porphyry.....	31
Figure 4. Photographs of rock illustrating structural particularities.....	32
Figure 5. Comparative diagram of different types of breccia.....	34
Figure 6. Isocon diagram of dissolution breccias.....	35
Figure 7. Western-Porphyry 3D geometry and alteration.....	36
Figure 8. Western end of the Main-Porphyry 3D geometry and alteration.....	37
Figure 9. Eastern end of Main-Porphyry 3D geometry and alteration.....	38
Figure 10. Chronology of brecciation events.....	39

## LISTE DES TABLEAUX

Table 1. Comparative table of Canadian Malartic breccias.....	40
Table 2. Principal characteristics of gold deposit types.....	41



## RÉSUMÉ

La mine Canadian Malartic, a été exploitée de 1935 à 1965 principalement pour ses zones à haute teneur aurifère, soit dans des lentilles de grauweekes altérées du Pontiac et dans des veines de quartz dans un porphyre non silicifié. À la suite des travaux de forage effectués par la Corporation Minière Osisko, il existe un grand nombre de données qui permet d'obtenir une meilleure compréhension du gisement aurifère Archéen, tant au niveau de la répartition tridimensionnelle de l'or et des altérations associées, que des structures majeures contrôlant les zones aurifères.

La modélisation 3D du gisement a permis d'établir la géométrie du contact entre le porphyre et les grauweekes du Pontiac, conjointement avec les teneurs en or et les principales altérations du camp minier de Malartic, soit la calcite, la silice et la pyrite. La distribution de ces altérations hydrothermales montre une très forte association spatiale avec le porphyre-ouest et les structures qui y sont rattachées. Plus à l'est du gisement, l'or et les altérations sont corrélés au contact du porphyre et se propagent dans les sédiments suivant les plans de faiblesse présents, litage et failles. Bien qu'elles ne soient pas développées de façon uniforme au travers du gisement, les brèches constituent un contrôle important des minéralisations. Trois types majeurs de brèches sont répertoriés, traduisant différentes étapes dans la genèse de Canadian Malartic. Le premier type est une brèche chimique à matrice de biotite-calcite-pyrite±silice, à fragments silicifiés, biotitiques et fortement corrodés et montre un enrichissement en Au-Ag-Bi-W. Le deuxième type est une brèche à matrice siliceuse, dans lequel deux sous-types se recoupent. La brèche la plus précoce, à quartz grisâtre cryptocristallin, possède les caractéristiques d'une fracturation hydraulique : fragments anguleux, jointifs, peu corrodés, et une faible distribution granulométrique. Celle-ci est recoupée par une brèche hydrothermale plus tardive, à quartz laiteux plus grossier et à fragments souvent corrodés. Ce deuxième sous-type est le seul type de brèche rencontré dans les unités porphyriques; aucune brèche hydraulique n'y a été observée. Le dernier type de brèche est caractérisé par un stockwerk à carbonates-séricite-chlorite±feldspath-k ne présentant aucune corrélation avec les teneurs en or. Elles enregistreraient une chute brutale de pression.

Le gisement de Canadian Malartic présente des caractéristiques atypiques d'un gîte de type porphyrique. Il y a cependant plusieurs facteurs favorisant une minéralisation syn-magmatique et à faible profondeur (<5km) : altération potassique bien développée, forte association spatiale de l'or et des altérations avec un porphyre syn-tectonique, et plusieurs générations de processus de bréchifications. Les caractéristiques générales du gisement ont des affinités principales avec les gisements d'or liés aux intrusions et aux skarns aurifères, mais plus particulière Canadian Malartic possède plusieurs éléments de ressemblance avec le gisement de Boddington, en Australie.

MOTS CLÉS : gisement d'or, modélisation 3D, brèche, Pontiac, porphyre

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Malgré la rareté des minéralisations porphyriques archéennes, quelques gisements récemment mis en production prouvent qu'elles constituent bel et bien une cible d'exploration importante pouvant amener à la découverte de méga-gisements. Des gisements de ce type sont ainsi exploités en Australie, au Canada et en Indes. Boddington dans le craton du Yilgarn, en Australie, pourrait comporter au moins un événement minéralisateur de type porphyrique (Roth, 1992). Dans la province du Lac Supérieur, le gisement de Troilus pourrait également appartenir au type porphyrique (Goodman *et al.*, 2005). La Corporation Minière Osisko a ainsi réévalué le gisement de Canadian Malartic, exploité de 1935 à 1965, pour une exploitation par fosse à ciel ouvert à faible teneur et fort tonnage. Le nouveau modèle prend en compte l'altération potassique bien développée dans le camp minier de Malartic (Fallara *et al.*, 2000) et la compilation de données de forages qui laissent sous-entendre un important contrôle de la minéralisation par un intrusif porphyrique intermédiaire (Wares, 2005).

Les travaux effectués sur la propriété Canadian Malartic démontrent le caractère disséminé de la minéralisation ainsi que leur contrôle par des niveaux de remplacement siliceux, probablement métasomatiques (Derry, 1939 et Sansfaçon et Hubert, 1990). Il existe plusieurs interprétations métallogéniques du camp minier de Malartic. Cependant, deux grandes écoles de pensée sont mises de l'avant : les interprétations de Trudel et Sauvé (1992) et de Sansfaçon (1986) considèrent la minéralisation comme étant synorogénique, tandis que d'autres modèles favorisent le modèle porphyrique (Poulsen *et al.*, 2000) ou associé aux syénites (Robert, 2001).

Dans le but d'éclaircir les contrôles sur la minéralisation aurifère et pour une meilleure compréhension du gisement de Canadian Malartic d'un point de vue structural, un projet de recherche conjoint UQÀM-Divex-Osisko a été mis sur pied. Plusieurs problématiques ont été mises de l'avant lors de l'élaboration du projet, puisque de nombreuses interrogations subsistaient toujours quant à la géologie et la genèse du gisement de Canadian Malartic. Parmi celles-ci, il y a la nécessité de contraindre structuralement la minéralisation et de définir le lien spatial et génétique entre l'or et l'intrusif porphyrique. Ainsi, la confirmation ou l'infirmerie de la théorie du gisement porphyrique Archéen

s'ajoute naturellement aux questionnements que va traiter ce mémoire. Les travaux effectués durant ce projet de maîtrise doivent d'ailleurs être considérés comme préliminaires ; c'est-à-dire qu'ils s'insèrent dans un cadre plus vaste où d'autres projets de maîtrises, doctorat et/ou post-doctorat pourront en bénéficier.

Pour y parvenir, plusieurs volets ont été explorés durant le projet de maîtrise, et ce à différentes échelles. La typologie et la caractérisation des processus de bréchification se sont effectuées par l'observation, la description et l'interprétation des séquences de brèches dans les carottes de forages. Pour plus d'une centaine de ces zones fracturées, un logiciel de reconnaissance de brèches a servi à l'évaluation des paramètres morphométriques diagnostiques des différents types de bréchification. Ces paramètres sont définis par la géométrie des fragments individuels (complexité, arrondissement et allongement) et par l'agencement des fragments entre eux (fabrique, dilatation et distribution granulométrique) (Bérubé, 2001). L'analyse de ces paramètres permet d'en déduire un ou des phénomène(s) de bréchification précis (Jébrak, 1997).

Par la suite, la cartographie de la propriété de Canadian Malartic a été effectuée en utilisant la classification préconisée lors des descriptions de forages et en mettant l'emphasis sur divers aspects structuraux (S0, S1, S2, couloirs de déformation, cisaillements ductiles-cassants). De plus, une zone minéralisée à proximité d'un intrusif porphyrique a fait l'objet d'une cartographie de détail pour mieux comprendre la relation entre la déformation et la minéralisation. Cet exercice a d'ailleurs permis de mettre en évidence une importante zone de bréchification jusqu'ici peu observée sur le terrain et en forage.

La dernière étape du projet de maîtrise a été la mise en commun des dizaines de milliers de données provenant de quelques centaines de trous de forage dans un modèle 3D sous gOcad®. L'objectif initial était la modélisation du contact entre les unités sédimentaires et porphyriques pour mieux comprendre la géométrie de l'intrusif et de ses conditions structurales de mise en place. Par contre, c'est avec l'ajout de données quantitatives (analyses chimiques pour l'or) et qualitatives (codification pour différents types d'altération) que le niveau de compréhension du gisement a été grandement rehaussé.

Ce mémoire est présenté sous forme d'article scientifique, qui sera ultérieurement soumis à une revue spécialisée dans l'étude des gisements minéraux. L'article a été rédigé par

l'auteur du mémoire, tant au niveau des idées que des figures qui y sont présentées. Michel Jébrak a agi comme deuxième auteur en tant que directeur de maîtrise, soit par son implication aux niveaux des pistes de recherches, de la relecture du manuscrit, de l'aide sur le terrain et du financement. Le troisième auteur, le géologue sénior Robert Wares, a été la personne ressource chez Osisko fournissant l'accès aux données, l'opportunité de travailler sur la propriété de Canadian Malartic ainsi que le financement du projet.

Plusieurs données complémentaires sont mises à la disposition du lecteur en appendice, à la suite de l'article dont fait l'objet ce mémoire. En appendice A, on y retrouve toutes les données qui ont servis à établir la classification des brèches de Canadian Malartic. L'appendice B étale les nombreux stéréonets des zones de cisaillements ductiles qui ont servi à leur modélisation. En appendice C, une compilation des données provenant des forages permet de visualiser la relation entre la minéralisation aurifère et les différents types d'altération incorporés dans le modèle 3D. Le lecteur peut se référer à l'appendice D pour obtenir un guide pratique pour l'élaboration d'un modèle 3D simple à partir de quelques forages. Finalement, l'appendice E est sous forme CD-ROM et contient de courtes séquences vidéo du gisement de Canadian Malartic en 3D.

## Référence

- Bérubé, D., 2001. La morphologie des particules: géométrie fractale et applications environnementales. Thèse de Doctorat, Université du Québec à Montréal, 224pp.
- Derry, D.R., 1939. The geology of the Canadian Malartic gold mine, N.Quebec. *Economic Geology* 34, 495-523.
- Fallara, F., P.S. Ross et R. Sansfaçon, 2000. Caractérisation géochimique, pétrographique et structurale: nouveau modèle métallogénique du camp minier de Malartic. Ministère des Ressources Naturelles, Québec, MB 2000-15, 155 p.
- Goodman, S., Williams-Jones, A.E. et P. Carles, 2005. Structural controls on the Archean Troilus gold-copper deposit, Quebec, Canada. *Economic Geology* 100, 577-582.
- Jébrak, M., 1997. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits : A review of mechanisms, morphology and size distribution. *Ore Geology Reviews* 12, 111-134p.

- Poulsen, K.H., Robert, F. et B. Dubé, 2000. Geological classification of Canadian Gold deposits. Geological Survey of Canada, bulletin 540, 106pp.
- Robert, F., 2001. Syenite-associated disseminated gold deposits in the Abitibi greenstone belt, Canada. *Mineralium Deposita* 36, 503-516.
- Roth, E., 1992. The nature and genesis of Archaean porphyry-style Cu-Au-Mo mineralization, Western Australia. Thèse de Doctorat non-publiée, University of Western Australia.
- Sansfaçon, R., 1986. Le district de Malartic in Structure et or, de Rouyn à Val-d'Or, Québec. Livret-guide GAC-MAC vol. 14, 76pp.
- Sansfaçon, R. et C. Hubert, 1990. The Malartic gold district In The Northwestern Quebec Polymetallic Belt: a summary of 60 years of mining exploration. Symposium Rouyn-Noranda 1990, 203pp.
- Trudel, P. et P. Sauvé, 1992. Synthèse des caractéristiques géologiques des gisements d'or du district de Malartic. Ministère de l'Énergie et des Ressources Québec, MM 89-04, 126 pp.
- Wares, R., 2005. Canadian Malartic Gold Deposit, Quebec – Three to four million ounce gold potential. ([http://www.osisko.com/pdfs/media\\_art\\_osisko\\_malartic\\_summary.pdf](http://www.osisko.com/pdfs/media_art_osisko_malartic_summary.pdf))

**PERIGRANITIC GOLD DEPOSIT OF CANADIAN MALARTIC (QUEBEC): 3D  
MODELING CONTRIBUTION TO METALLOGENIC INTERPRETATION**

Christian Beaulieu <sup>a,\*</sup>, Michel Jébrak <sup>a</sup> and Robert Wares <sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère – Université du Québec à  
Montréal (UQÀM), C.P. 8888 Succursale Centre-ville, Montréal, Québec, Canada H3C 3P8*

<sup>b</sup> *Corporation Minière Osisko, Station Windsor, Bureau 300, 1110, De La Gauchetière Ouest,  
C.P. 211, Montréal, Québec, Canada H3B 2S2*

\*Corresponding author. Tel: +1 (514) 656-1058;

E-mail address: beaulieu.c@gmail.com

## Abstract

The Canadian Malartic deposit is located in the Pontiac Subprovince and a few hundred meters south of the world-renowned Cadillac – Ladder Lake fault, mainly known for its numerous orogenic gold deposits. The Canadian Malartic mine (1935-1965) was mainly mined for its high-grade gold zones inside altered greywacke lenses in the Pontiac and in quartz veins inside an unsilicified porphyry unit. The character of this deposit is, however, atypical in the Abitibi mining context as its disseminated and widespread mineralization is distinct from the more usual quartz-carbonate vein deposit. A better understanding of the Archean gold deposit is now possible after an extensive drillhole campaign, through three dimensional modeling of gold, alteration and the porphyry intrusive body linked with mineralization, and structural analysis of brecciation processes.

Three dimensional modeling established the porphyry-greywacke contact, coupled with gold grades and the main alteration encountered in the Malartic mining camp (silica, calcite and pyrite). This model demonstrates the very strong spatial relationship between gold, alteration and the porphyry unit, mainly in the western part of the deposit. Major structural weakness planes, such as bedding, faults and breccias, connected to the porphyry were used as fluid flow paths, illustrated by alteration connectivity between ore zones. While breccias occur scarcely throughout the deposit, they have an important control on ore deposition and recognition. Three major types of breccias are encountered, each one accounting as an important stage in the Canadian Malartic genesis. The first type to develop is a dissolution breccia recognized by its calcite-biotite-pyrite±quartz matrix, and silicified, partly biotitized and well-corroded fragments. They also show a good enrichment in Au-Ag-Bi-W. An almost pure silica matrix forms the second set of breccias, where two crosscutting sub-types can be distinguished. The earliest sub-type, with greyish cryptocrystalline quartz, has several parameters typical of a hydraulic fracturing: angular, jointed, and weakly corroded fragments, and low particle size distribution. A later hydrothermal brecciation process crosscuts these hydraulic breccias where the quartz forming the matrix is coarser and milky white and the fragments usually have their boundaries more corroded. This second sub-type of breccias is the only one encountered inside the porphyry unit; no hydraulic breccias were observed. The last brecciation stage implies a carbonates-sericite-chlorite±K-feldspar stockwork, with no peculiar relationship with gold concentrations, and recording a sharp pressure and/or temperature decrease.

There is no consensus as to whether or not the Canadian Malartic is a porphyry-type deposit, but there are several factors in favour of a syn-magmatic mineralization: widespread potassic alteration, well-developed and different generation of brecciation processes with favourable metal associations, and a strong spatial association with a syn-tectonic porphyry unit. The overall characteristics of the deposit have affinities with both intrusion-related gold deposits and Au-skarns, and more particularly with the Boddington deposit.

**KEYWORD:** gold deposit, 3D modeling, breccias, Pontiac, porphyry

## 1. Introduction

The Canadian Malartic gold mine, located in the Abitibi greenstone belt in the Superior Province (Figure 1), Canada, entered production in 1935, twelve years after the first discovery of a gold prospect by the Gouldie brothers just south of the property. It is the first major deposit to be proven economic in the district, followed three years later by the east-bounding Sladen Malartic (later called Barnat – Sladen mine) and East Malartic mines (Figure 1). Canadian Malartic production ended in 1965, where 37.22 t Au were extracted (Trudel and Sauvé, 1992), mainly by mining altered greywacke lenses located in brecciated and fractured zones, and in quartz veins hosted in unsilicified porphyry (Derry and Hertz, 1948).

O’Neil (1934), Derry (1939) and Derry and Herz (1948) are the first to describe the geology of the mine. Their work is of major importance since it gives us a clear view of the structural patterns of mid- to high-grade gold zones, parts of the deposit that are now difficult to access via drillhole exploration; the ancient stopes and drifts being unreachable and obstacles for a good core recovery. However, at the time of their mining gold grade was much higher with an average value of 3.37 g/t (Trudel and Sauvé, 1992) and markedly different from the present situation where the average grade is around 1.0 g/t Au.

The geology of the Canadian Malartic and surrounding deposits all share common aspects regarding ore, ranging from quartz-albite pegmatitic vein, the common quartz-lode, silicified and pyritised host rock, and chlorite (Gunning and Ambrose, 1948). However, the specificity of the Canadian Malartic deposit resides in the disseminated character of gold and sulfide minerals, highly dominated by pyrite, combined with a pervasive and omnipresent silicification and carbonation in ore zones. Recent research conducted by Fallara *et al.* (2000) delineated a potassic alteration halo in sediments and porphyries hosting the deposit. Osisko Mining Corporation (then Osisko Exploration Ltd) decided to revise the geologic model in order to reopen the Canadian Malartic mine as a low-grade, bulk tonnage gold deposit following the copper-gold porphyry-type ore deposit model (Wares, 2005).

This interpretation of Malartic as an Archean porphyry gold deposit is clearly atypical in the Abitibi mining context which is largely known for its gold-bearing quartz-carbonate veins. It is also uncommon as for such deposits in the Archean since only a few



examples of gold-only porphyry deposits are known worldwide. Robert (2001) synthesized the geologic features of similar deposits in the Abitibi greenstone belt, but while Canadian Malartic shares many of these features, it seems, however, to be in a different class, mainly because of its peculiar tectonic setting. Groves *et al.* (2003) and Duuring *et al.* (2007) provide major insights on how to distinguish porphyry-type mineralization from orogenic ore deposits, or intrusion-related gold deposits. Kerrich *et al.* (2005) proposed that Archean analogues of Phanerozoic porphyry deposits would presumably be less well preserved since erosion has been active for more than 2 Ga. On the other hand, despite erosion since late Archean, many deposits are now being reconsidered or discovered with this new approach involving mid- to high-level porphyry mineralization: Troilus (Goodman *et al.*, 2005), Launay (Jébrak and Doucet, 2002) and Don Rouyn (Goldie *et al.*, 1979) to name a few in the Superior Province (Canada), and Boddington (Yilgarn, Australia; Roth, 1992) deposits which all seem to comprise at least one mineralizing event common to Phanerozoic porphyry deposits.

In order to fully understand the geologic setting of Canadian Malartic from an exploration point of view, several questions needed to be clarified. Ongoing research will be the subject of subsequent papers and will discuss the geochemistry of alteration and the porphyry stock. This paper will emphasize the structural setting and evolution of the Canadian Malartic gold deposit. Previous interpretations made by Trudel and Sauvé (1992) and Sansfaçon (1986) considered the mineralization to be epigenetic and synorogenic, while other models favor the porphyry model (Poulsen *et al.*, 2000). Considering these interpretations, this paper will try to draw light on whether or not the gold has been deposited in a porphyry environment and on the structural controls of ore genesis. Different scale observations were used to achieve these goals: from thin section and drillhole observations to detailed geologic mapping and large scale 3D modeling using gOcad®. This paper will focus on the Canadian Malartic deposit and the Sladen extension, which are part of the same continuum.

## 2. Regional Geology

The Malartic mining district is located west of Val-d'Or city, a well-known gold district, in the south-eastern part of the Superior Province (Figure 1). Unlike most of the major gold mines of the Abitibi greenstone belt, the Canadian Malartic deposit lies southward of the major Kirkland – Cadillac fault zone, in the Pontiac subprovince at the boundary with the Abitibi greenstone belt. This boundary is recognized as a late Archean terrane suture and its associated shear zones are limited to fold structures (Benn, 2006). More precisely, the deposit is confined to the metasedimentary Pontiac Group where lithologies are mainly subarkosic sandstones interbedded with siltstones, black shales and locally iron formations, typical of greywackes, flysch-type units (Derry 1939; Sansfaçon 1984; Fallara *et al.*, 2000). As interpreted by Calvert and Ludden (1999), the Pontiac metasedimentary group would represent a relict accretionary wedge, given the fan-like geometry. The source region would be north of the group since the bed thickness, sand/shale ratio and overall grain size all decrease from north to south (Lajoie and Ludden 1984). Davis (2002), however, suggested the possibility that the Pontiac sediments ( $2685 \pm 3$  Ma) could represent a foreland basin developed from an accretionary prism. Evidence also shows that these sediments were deposited broadly at the same time as a deformational event since plutons interpreted as syntectonic by Benn *et al.* (1994) have broadly the same age as the Pontiac turbidites (Davis 2002). Later studies by Benn (2006) shows that the Pontiac subprovince as a whole would be a tectonic indenter in the younger, hotter and weaker Abitibi subprovince, where the lower crust of the Pontiac subprovince wedges into the Abitibi crust. This southern Abitibi thrusting over the Pontiac basin is thought to be the trigger of the early recumbent folds seen in the metasedimentary units of the Pontiac (Benn 2006).

The metamorphic facies as reported by Fallara *et al.* (2000) increases from north to south, ranging from greenschist in the Malartic and Cadillac Group to lower- to mid-amphibolite in the northern Pontiac Group. Further south in the Pontiac Group, the biotite-staurotide isograd is reached. The area of interest is mainly in the lower-amphibolite facies (Sansfaçon, 1986).

Sansfaçon and Hubert (1990) established polyphase tectonics in the Pontiac Group just south of Malartic township (Figure 1) by identifying three major deformational phases: (1)  $D_1$  forming a series of anticlines and synclines with a NE-SW axial plane; (2)  $D_2$  that produced a

penetrative NW-SE schistosity, accompanied with minor folding (antiforms and synforms) overprinting those produced during  $D_1$  and well documented as s-shaped folds; and (3) post- $D_2$  conjugated fractures and kink folds (Fallara *et al.*, 2000).

### 3. Malartic Mining Camp

Producing over 265t of gold through the 1900's, the Malartic mining camp is now no longer operating. The East-Amphi mine (Richmont Mines Inc.) was the last one to close (2007). Located in diverse geological units, nine deposits around Malartic have been exploited since 1935. Three of these deposits are located within a zone of approximately 3km by 2km around the Malartic Township: the East Malartic, Barnat-Sladen and Canadian Malartic mines, and produced more than 160 t Au. These three deposits all lie, locally at least, in the Pontiac Group; Canadian Malartic is the only deposit restricted to the Group.

The East Malartic deposit was discovered in 1937 by borehole exploration and is mainly confined to the Sladen fault zone at the contact between the Pontiac and Piché Groups (Figure 1) and along minor intrusive rocks or competent Pontiac sedimentary unit masses. The Sladen-Barnat mine began operation in 1938, focusing the mining along three different, but related, fault zones: the Sladen fault (restricted to the Pontiac Group), the Barnat fault (boundary between the Pontiac and Piché Groups) and the Malartic fault (boundary between the Heva Formation and the Cadillac Group to the north, and the Piché and Pontiac Group to the south) (Fallara *et al.* 2000). The other deposits, Malartic Goldfields, Malartic Hygrade, Camflo, First Canadian, Black Cliff and East-Amphi will not be much addressed in this paper since they are not contiguous with the Canadian Malartic deposit.

### 4. Methods

Several methods were used for a better understanding of the structural pattern of the Canadian Malartic gold deposit, all at different scales: (1) borehole observation; (2) field surveys; and (3) 3D modeling.

Borehole observations were made to distinguish structurally and mineralogically among the diverse types of breccia occurrences throughout the deposit. This step was accomplished with two different approaches: (1) by core observation and description and (2) by structural analysis on high-definition borehole imagery (WellCAD®). The first method was carried out by measuring six breccia-related morphometric parameters, as defined by Jébrak (1997) and Bérubé (2001): (1) particle size distribution (PSD); (2) complexity (or roughness), (3) roundness and (4) elongation of fragments; and (5) fabric and (6) dilation of fragments between them. To evaluate these parameters, a composite picture software was used. This software is implemented in an Access Database dedicated to breccias (BDR; Breccia Digital Recognition). The reader may refer to the Appendix A in the principal author's master's thesis to visualize those parameters. These parameters permit a well-constrained quantitative and genetic classification of the different types of brecciation processes encountered at Canadian Malartic (e.g.: a high complexity of fragments often means a high chemical disequilibrium, hence a corrosive wear of fragments during, or slightly after, the main mechanical brecciation process (Jébrak, 1997)). These parameters, alongside a brief mineralogical description of matrices and associated alteration, have been enough to distinguish different breccias and to clarify their genesis. The structural analysis was also conducted using high-definition borehole imagery combined with a log composite software (WellCAD®) to retrieve orientation data on breccia contacts with the host rock and on fabric of the fragment population. These two last methods of observation were also used to clarify the nature of the intrusive contacts in the Pontiac greywackes, along with thin section characterization.

Field surveys were run to map the geology of the Canadian Malartic property (Figure 2) with the new model and alteration codes set up by Osisko Mining Corporation. Since only two major lithologies are encountered in the deposit, the classification resides mainly in the GR (greywacke) and PO (porphyry) suffix. To these are added the most coherent prefix based on the predominant alteration: A for weak biotitic alteration, C for carbonatization, S for silicification, REM for moderate to strong rock replacement, and BR for hydrothermal brecciation. These codes give a vast array of possible combinations to rapidly decipher the strongest alteration and protolith (e.g.: an SGR would be a highly silicified greywacke, where a BRPO would be brecciated porphyry). In a typical mineralized zone at the boundary of a

porphyry contact, there is continuity of these alteration types: AGR-CGR-SGR-REMGR-BRGR-BRPO-REMPO-SPO-CPO-APO. An outcrop stripping was also conducted for detailed geologic mapping in a mineralized area and near mined zones, a few meters away from the porphyry intrusive body. Field geology mapping was combined with the information provided by Derry (1939), Eakins (1962), Sansfaçon and Hubert (1990) and Fallara *et al.* (2000).

The large-scale phase of this study is based on the thousands of drillholes available (historic and recent drillholes), with approximately 1,500 of them coming from definition drilling and compiled with the new approach to mapping the gold deposit, combined with a 3D modeling software (gOcad®). The 3D modeling tools were used to understand the geometry of the metasediment – porphyry contact, in conjunction with several logged parameters for each core sample (approx. 1.5m), such as alteration (carbonates, silica and pyrite), veining and gold assays. Historical drillholes were useful to validate the model within uncertainty zones. The models presented in this paper all refer to observations made by geologists in charge of core description, exception for gold assays. The large number of drillholes on the property has been inevitably logged by numerous different professionals, and consequently there are differences in interpretations of features observed in the core. These have been taken into account while modeling the Canadian Malartic deposit in three dimensions.

## **5. Results**

### **5.1. Canadian Malartic Porphyry**

Derry (1939) distinguished between the two main masses of outcropping porphyry on the Canadian Malartic property: (1) the Western-Porphyry (WP) and (2) the Main-Porphyry (MP) linked at a depth of approximately 230 meters where they coincide in a S-fold in the hinge of a drag-fold (Figure 2). The nature of this link is still unknown, but many features have been used throughout the deposit to determine whether the intrusive body is pre-, syn-, or post-tectonic. Sansfaçon (1986) suggested that the main porphyry is a single folded and faulted intrusion, recording the same deformation as the host greywacke during the second

deformation event ( $D_2$ ), and it was assumed the porphyry would be pre- or syn- $D_1$  as per Fallara *et al.* (2000). Their observations are also based on folded felsic and mafic dykes south and east of the Western-Porphyry and south of the Main-Porphyry. Other authors believe that the overall shape of the porphyry intrusion is rather derived from the pre-existing structures, essentially from folds related to the  $D_2$  event (Eakins, 1962).

The description of the monzodiorite porphyry (*J.Clark, pers. comm.*) units has been separated into three (Western-Porphyry, Main-Porphyry and satellite dykes) given the nature of their respective contacts with the host rock, along with their overall 3D geometry (Figure 3). Despite this segregation, they seem to be apophyses of a single intrusion.

#### **5.1.1. Western-Porphyry**

The Western-Porphyry (WP) body shown in Figure 3 with a distinctive, easily recognizable tubular, pipe-shaped geometry is the Western-Porphyry. In plan view (Figure 2), this structure is approximately 400 meters long with an east-west trend, closing at the western end of the property. At depth, the footwall contact has not been encountered in the vicinity of the Main-Porphyry intrusion. However, when traveling west from this linkage zone, the footwall contact is crossed, as the greywacke sequences reappear underneath the Western-Porphyry, giving it a perched-sill look. A small spur detaches from the Western-Porphyry on the southern border and is directly connected to the P Zone at surface, linking with the F Zone which is closely related to the Western-Porphyry. At depth, the sill-like structure tends to open more widely and loses its sill-like appearance.

The intrusive nature of the porphyry contact can be seen in some areas by its interfingering in metasedimentary rocks (Figure 4a). Little to no schistosity penetrating the Western-Porphyry body was observed in drillholes, as the intrusive unit appears to set in a schistosity plane. Near the southern border of the sill-like porphyry body (detailed mapping; Figure 2a), there is evidence of a sinistral brittle-ductile shearing parallel to the porphyry contact that could be relict of  $D_1$  as reported by Sansfaçon and Hubert (1990).

### 5.1.2 Main-Porphyry

The Main-Porphyry (MP), shown in Figure 3, is clearly distinct from its western counterpart since it is truncated by the Sladen fault and its general geometry differs.

The Main-Porphyry mass occupies a large part of the Canadian Malartic total volume, measuring at least 1500 meters wide and 350 meters deep (its real depth remains unknown since too few drillholes pierced through the porphyry). The overall shape of the Main-Porphyry shifts from an east-west trend to mainly east-south-east trend in the eastern part.

The Main-Porphyry is a partially mylonitised where it is truncated by the Sladen fault. This mylonite is mostly absent from the metasedimentary units lying at the Main-Porphyry's western tip since the deformation produced a series of brecciated units later discussed. Since its eastward tip is clearly tightly folded it is believed that there is continuity from a ductile to a brittle/ductile deformation from east to west. Since small spurs or branches of the main porphyry intrusive complex are thoroughly deformed, it is assumed that it suffered little deformation compared to the host rocks, which are well-deformed in S-shaped folds ( $F_2$ ). Rarely schistosity is recognizable inside the porphyry mass outside the contact zones with the Pontiac sediments. The dip of the Main-Porphyry is at  $45^\circ$  dip near the eastern end, reported by 3D modeling.

*En echelon* faults or deformation corridors have been recognized in the porphyry and infer dextral brittle fault zones, roughly oriented E-W.

### 5.1.2. Satellite dykes

A set of satellite porphyry dykes occur in the center of the deposit. These dykes are roughly oriented E-W (Figure 2). As reported by Sansfaçon and Hubert (1990), these dykes are clearly deformed by the  $D_2$  event. They are also discontinuous at depth; probably being faulted but no such evidence has been observed as these sub-vertical intrusive units may be too thin for vertical boreholes to crosscut them at depth. Three dimension modeling shows that there are three major and parallel set of dykes.

## 5.2. Breccia Classification

Three major type of breccias were recognized in the Canadian Malartic deposit (Table 1; Figure 4b, c, d, e, f), recognition essentially based on their matrix composition. Morphometric analysis tends to confirm this classification and is necessary to decipher the brecciation process (tectonic comminution, hydraulic fracturing, corrosive wear...). Geochemical and isocon analysis were also useful to validate this classification.

### 5.2.1. Biotite-Calcite-Pyrite±Quartz Breccia (BR-A)

The first set of breccia (dissolution breccia; Figure 4b, e) discussed here has not been recognized previously at Malartic. Dissolution breccias are discriminated by their multi-mineral matrix formed of biotite-calcite-pyrite±quartz, all in various proportions. The other key diagnostic is the advanced corrosive wear the fragments endured, visible by the complex and altered biotitic rims. Most specimens have a moderate fragment fabric, while only a few are clearly foliated.

The great majority of these breccias are related to a subsequent silicification associated to a later brecciation process discussed below. Where this silicification is more pervasive, the breccias are less deformed, and more mineralized. Close observation of these breccias shows that they can develop in the hinge of a fold zone where schistosity is at high angle with the bedding. It is not always the case since some specimens develop roughly parallel to bedding and  $S_2$  (see detailed mapping; Figure 2a). The detailed mapping shows that dissolution breccias developed parallel to  $S_2$  planes and propagated in  $S_0$  to a lesser extent. They also seem to be better developed in competent sandstone layers near more ductile mudstones or siltstones layers. Some specimens have been encountered in finer grained greywackes but biotitic rims are limited to absent. There is also evidence of biotitic alteration related to dissolution breccias infiltrating the schistosity (Figure 4e).

Since the dissolution breccias are commonly limited to very narrow corridors, their mapping is somewhat difficult. However there is a strong spatial association of these breccias bodies with the eastern tip of the Western-Porphyry, where they are better developed and thicker.



These breccias are of economic importance since they are enriched in gold (Figure 5). Dissolution breccias also show good enrichment in bismuth, arsenic, tungsten, tin, molybdenum, lead and silver, and a slight enrichment in  $K_2O$ , revealed by isocon analysis (Figure 6). The parent rock used for comparison underwent potassic alteration (biotite and K-feldspar rich greywacke), thus the small enrichment in  $K_2O$  in spite of strong biotitic alteration. There is however no mass change for silica.

Some of these breccias appear, locally, to have endured strong silica alteration to the point to be unrecognizable. The matrix may have completely replaced the fragments and therefore been logged as “replaced greywacke” instead of brecciated greywacke. It is furthermore difficult to recognize this type of breccia as it is commonly intensely silicified and breccia textures may be obliterated.

### **5.2.2. Silica Breccia (BR-B1, BR-B2)**

The most widespread breccias (silica breccia; Figure 4c), and the only one described in previous works (Gunning and Ambrose, 1948), is characterized by a silica-only matrix with minor impurities, interpreted as tellurides. Further observations can clearly distinguish two generations of this breccia, sometimes visible in the same sequence which gives the only cross-cutting evidence of the hydraulic breccia by the silica breccia (Figure 4f). For ease of understanding and to avoid ambiguities, the first order silica breccia (BR-B1) will be referred as the “hydraulic breccia”, whereas the second order silica breccia (BR-B2) will be referred as the “silica breccia”. Evidence is also shown by different fragment organization and angularity or roughness, and by variation in quartz texture. The hydraulic breccia displays an almost-jointed structure with moderate dilation and a nearly-absent fragment rotation, thus the fragments fairly sharp edges. The silica breccia shows a higher fragment complexity coupled with a higher fragment elongation. Quartz forming the matrix is coarser and milky-white, rather than the cryptocrystalline translucent quartz of the hydraulic breccia. No evidence of an hydraulic breccia cross-cutting dissolution breccias has been observed; however there is clear evidence that silica breccias overprints dissolution breccias (Figure 4c).

Structural analysis of silica breccias has shown an average orientation more or less parallel to  $D_2$  (see Figure 2b), as depicted by Fallara *et al.* (2000). The main orientation of internal fabric of fragments is also broadly in the same direction and has the same dipping as their contacts, which is WNW-ESE (see property geology, Figure 2).

In the 3D model, these breccias appear mainly near the Main-Porphyry contact, as well as in the western extension of the Sladen fault above the linkage zone between the Main-Porphyry and Western-Porphyry. There is also a small discontinuous brecciated zone in the southern part of the deposit, inside the greywackes and near the southern contact of the satellite porphyry dykes. Since hydraulic breccias are rarely observed, no general trend or 3D modeling could be accomplished. However they mainly occur in the vicinity of the Western-Porphyry eastern tip and in conjunction with silica breccias.

Relative balance of gold to the altered host rock shows a clear depletion of gold inside hydraulic breccias, despite announcing a mineralized zone (Figure 5). Historically mined breccias were probably high-grade zones subsequently brecciated, therefore diluting the ore.

### **5.2.3. Stockwork Breccia (BR-C)**

This last breccia (stockwork breccias; Figure 4d) is the least recognized of the three types. Stockwork breccias are characterized by a matrix of carbonates, K feldspar, chlorite and sericite in a stockwork structure with little to no rotation of fragments. Corrosion of fragment and fabric are also absent, while dilation is moderately low. Some stockwork breccia samples can be anomalous in gold, where others are completely sterile; it actually depends of the initial alteration of the host rock, meaning that there is no upgrading in gold due to the stockwork setting (Figure 5).

## **5.3. Gold Mineralization and Alteration**

Three dimensional modeling also permitted a clearer comprehension of gold mineralization and its related alterations relative to the porphyry intrusion and surrounding structures. The modeled alteration is by silica, calcite and pyrite, and these will be referred

hereafter as the *main alteration types*. Mineralization and alteration are clearly distributed differently through the porphyry from the western to the eastern part of the deposit.

Three dimensional views show that there is a good continuity in the distribution of gold grade and the main alteration types throughout the deposit. However, given the general pattern of the mineralized shell, it is possible to divide the deposit in three distinct regions: (1) the Western-Porphyry and its surrounding sediments; (2) the Main-Porphyry and overlying sediments; and finally (3) the Sladen Fault surroundings, related to the eastern end of the Main-Porphyry.

### **5.3.1. Gold and alteration in the Western-Porphyry Region**

As seen in Figure 7, what discriminates the Western-Porphyry is the gold mineralization, as well as calcite and silica alteration, penetrating the bulk of porphyry mass in the first 150m of depth. Hydrothermal fluids seem to have been restricted to the intrusive unit as there is little gold mineralization and alteration in the adjacent greywacke. It is also the locus of intense alteration by calcite and silica throughout the intrusion, whereas pyrite remains more or less restricted to the gold zones.

In greywackes south of the Western-Porphyry, gold follows a definite path (Figure 7) and it would follow a more porous and/or permeable strata or pre-existing structures. Note that this mineralization dipping at roughly 70° is connected to a small spur detaching from the porphyry at approximately 275m depth. The expression of this mineralization at surface is represented by the P-Zone, where it adopts an antiform shape. Gold rich greywackes north to the Western-Porphyry are less well connected and seem to be mainly associated to high calcite and pyrite concentrations (Figure 7).

Further east near the Main-Porphyry transition, gold and alteration show a very good distribution at the summit of the porphyry along its contact with Pontiac greywackes. This is the most well-developed segment throughout the deposit as mineralization is tightly associated with the porphyry intrusion.

### **5.3.2. Gold and alteration in the Main-Porphyry Region**

The major feature of the gold distribution in the Main-Porphyry zone is its limited penetration inside the porphyry intrusion. As seen in Figure 8, the upper portion of the porphyry was the main target of mineralized fluids. It is perhaps only a general rule since the alteration and gold model shows clear infiltration inside the main mass, generally starting at curvatures along the porphyry contact.

There is also a control inside the Pontiac sedimentary units along a structural trap where the fluids connect with the porphyry at a high angle (approximately 60°, see Figure 8). These ore fluid paths are also strongly silicified and the associated structures are often obliterated, thus structural observation being difficult.

The linkage between the porphyry- and Pontiac-related ore has a bowl-shape in 3D and closes at east where the Main-Porphyry tends to be thinner and the Sladen fault more important.

### **5.3.3. Gold and alterations in the Sladen fault Region**

This part of the deposit (Figure 9) is mainly characterized by the Sladen fault acting as a mylonitic zone at the contact between the thinner porphyry intrusion and the Pontiac sedimentary units. Mineralization is continuous from the Main-Porphyry region to the Sladen fault where the alteration is less developed compared to the Western-Porphyry and Main-Porphyry, except for calcite. What is striking, however, is the more or less chaotic gold distribution in the sedimentary units above the porphyry, compared to the bowl-shape located immediately to the west. Only small scattered pockets are gold-rich and are associated with no well-developed silica or pyrite alteration.

There is, however, what seems to be a control on silica alteration south of the porphyry tip (Figure 9), as silica spreads along conjugate fractures and is concentrated at their junction. This intersection is associated to an auriferous zone, but is contiguous at the same time with the Sladen fault. It is unclear which of the two controlled mineralization.

Of all the three-modeled alteration types, calcite is the most extensive one, followed by silica then by pyrite. What is consistent, however, is that where the three alteration types are well developed, gold is higher grade. As shown by Wares (2005), gold is in greater concentrations at the contact of the porphyry with the Pontiac sedimentary units. Higher grades also occur at flexures in the porphyry geometry.

## **6. Discussion**

Brecciation processes in the Canadian Malartic deposit have not attracted the previous workers. However, they provide insights of catastrophic events in the setting of a deposit. The different styles of breccias in the deposit allow to distinguished three different stages, coupled or not with enrichment in gold, tungsten, silver and bismuth.

### **6.1. Brecciation Episodes**

Porphyry deposits often display an array of dissolution brecciation since hydrothermal fluids are normally in high disequilibrium with the host rock. Dissolution breccias' (BR-A) corrosive aspect is a powerful enough property to interpret the last mechanism of brecciation of these fractured rocks as of chemical origin. This feature is a good diagnostic of a high fluid-rock exchange rate and would account as a potassic alteration given the early-stage brecciation, the mineral association and the slight enrichment in  $K_2O$ . These breccias show evidence of overprinting of an earlier schistosity, as well as propagation along bedding weakness planes and E-W sinister brittle-ductile shear zones (detailed mapping, Figure 2a).

Based on their properties, the first order silica breccias (BR-B1) appear to be products of a probable hydraulic brecciation process (as depicted in previous sections), typical of an environment with a rapid increase in fluid pressure, causing a decrease in effective pressure (Jébrak, 1997). Since second order silica breccias (BR-B2) have an almost pure silica matrix and smaller fragments, they are assumed as undifferentiated hydrothermal breccias, or possibly derived from tectonic comminution. Given their general orientation parallel to  $D_2$ , they would have an inherited fabric prior to hydrothermal alteration, or his setting would be

synchronous. This same hydrothermal brecciation corroded these fragments and was associated with an extensive pervasive alteration in the wall rocks.

The final mechanism of brecciation, and the least important in term of mineralization, is the stockwork breccias. The morphometric properties discussed above are for a volume expansion after a large pressure decrease, which could account as a retreating magma chamber.

A summary of brecciation episodes is presented in Figure 10.

## 6.2. Proposed Geological Model

The understanding of the Malartic deposit is of major importance for targeting similar style of deposit in Archean terranes. One of the major challenges is to constrain mineralization events relative to the structural evolution, as in pre- syn- or post-major tectonic events, D<sub>2</sub> in Malartic. With all the advancement made through structural interpretation and 3D modeling, several conclusions can be drawn about the succession of events leading to the Canadian Malartic deposit.

The Pontiac greywackes sedimentation was closely followed, and probably synchronous, with the first regional deformation phase D<sub>1</sub> (Davis, 2002). This deformation would have been responsible for sinister, brittle-ductile shears more or less parallel to the primary bedding. The monzodiorite porphyry was emplaced during the last stages of this deformational event, probably following early-D<sub>1</sub> structures (Fallara *et al.*, 2000). Structural evidence previously discussed and the three dimensional geometry of the porphyry are demonstrating that deformation was still active during its emplacement. This timing is also based on the fact that the porphyry unit did not suffer pronounced ductile and penetrative deformation in its core during any tectonic event.

Isoclinal first order folds (P<sub>1</sub>) were observed south of the East Malartic mine (Sansfaçon, 1986) and regionally by Dimroth *et al.* (1983). Following the mapping of the Canadian Malartic property, the principal schistosity observed is more or less parallel to the bedding (figure 2). The sub-vertical dip of the Pontiac greywacke, at least in the vicinity of the Western-Porphyry, would account for isoclinal folds created by this penetrative schistosity.

The first brecciation process related to gold mineralization (dissolution breccias) followed the emplacement of the monzonitic porphyry, and perhaps the bulk of  $D_1$  deformation. This conclusion is based on a high correlation between hydrothermal fluids (gold and main alterations) and the porphyry – greywacke contact. The breccias are best developed near the Western-Porphyry contact, as their thickness and gold content decrease with distance from the porphyry, probably accounting as depletion in the metal content of the hydrothermal fluid. The potassic nature of the alteration producing dissolution breccias suggest a relatively high heat source, hence the presence of a nearby intrusive unit being another argument on the genetic link between these breccias and the monzonite emplacement. The overprinting of the biotitic alteration over the schistosity shows that the potassic alteration stage is late compared to this deformational phase. It is not clear however if this schistosity is an  $S_1$  or an  $S_2$ . Deciphering this ambiguity would perhaps solve some problems in the timing of the potassic alteration. The strong spatial relationship of well-developed and continuous dissolution breccias with the eastern tip of the Western-Porphyry suggests that hydrothermal fluid was at a maximum through these units. It is also the locus of the majority of replacement-type greywacke and the typical alteration sequence. Favorable structures in the porphyry unit seem to be absent since no such breccias are observed. This leads to the idea that the mechanical brecciation process leading to a dissolution breccia would be pre-porphyry intrusion. However, the presence of veinlets composed of biotite-calcite very similar to the dissolution breccia matrix demonstrates that this alteration was not limited to the Pontiac greywacke.

The next step was a relatively well-developed system sealing by the second generation of breccias (BR-B), beginning with the hydraulic fracturing (BR-B1), and relatively limited in total volume. This breccia type crosscuts dissolution breccias and mineralized zones, hence diluting the ore but are always indicating a high-grade sequence. Evidence of crosscutting of the hydraulic breccias by the silica breccias indicates that fluid pressure decreased just below the critical tensile strength of host rocks. Hydraulic breccias exclusively developed in sedimentary units, while silica breccias fractured both porphyry and/or sedimentary units. These observations suggest an initial fluid pressure barely greater than the tensile strength of greywacke, since a small pressure drop would generate silica breccias. It is not clear,

however, if the brecciation preferentially took place in these weakness zones or if their formation was synchronous with deformation.

The following step was the second major deformational event affecting the Pontiac sedimentary units ( $D_2$ ). Asymmetric sinistral S-shaped folds and associated NW-SE faults mapped by Sansfaçon and Hubert (1990) give the final structural character of the Pontiac greywackes in the Canadian Malartic region. This deformation was concentrated in proximity to competent units, such as the porphyry intrusions. There is a good example of such structure in the drag-fold observed by Derry (1939) and confirmed on the field, where the Western-Porphyry is used as an anchor point for this deformation. It is also visible in a detailed map (Figure 2a) where the brittle-ductile shear zones have been rotated to accommodate this sinister drag-folding.

No proof of intense deposit deformation has been encountered. The synform-like shape of the Canadian Malartic ore shell could be a relic of pre-existing folding and fracturing. Many sheared intermediate/mafic units are encountered in borehole observations and their deformation is often focussed at the contact with quartz vein, porphyry dyke and competent silicified units. Observations made in the Barnat deposit, contiguous with Canadian Malartic, confirm this last assumption since strongly deformed ultramafic units are frequently at the contact of porphyry or dioritic dykes. This deformational episode is associated with late Cadillac – Larder Lake fault movements, and was the last important one. As shown by the two principal orientation of the ductile shear zones (N090 and N120, as observed in detailed mapping, Figure 2a), their intermediate/mafic protolith would have been emplaced in late- $D_2$ , following NW-SE faults and E-W bedding and brittle-ductile shears.

Field observation provided evidence of a last brittle deformation event. Some restricted brittle fault sets orientated NE-SW, with apparent sinistral movement, are assumed to be relict of the Grenvillian orogeny.

The global geometry of the deposit may suggest that hydrothermal fluids followed the pre-existing  $D_1$  structures and bedding planes.  $D_1$  deformation was indeed more important than reported in previous works, as presumed by Fallara *et al.* (2000), and it may have produced enough structural traps into which fluids could migrate.



On the other hand, if the porphyry was emplaced during late- $D_1$ , and mineralization followed  $D_2$  weakness planes, there would have been no genetic relationship between the intrusion and gold mineralization. The porphyry body would only have acted as a structural trap where fluid path focussed.

To place the Canadian Malartic deposit in a specific ore deposit class is challenging. As demonstrated in Table 2, Canadian Malartic shares some similarities with many deposit styles, but more particularly with both Au-skarn and intrusion-related gold deposit. Similar to Au-skarn, we find highly replaced horizons in the deposit, which accounts for a large proportion of mineralization. There is however a lack of typical minerals (garnet, pyroxene) that defines a skarn, as the host rock is not a limestone. As for intrusion-related deposits, Canadian Malartic shares some features, such as a spatial relationship with an intrusive unit, Bi-W-Te metal association, and probably a reduced environment during deposit setting.

## 7. Conclusion

The strong pervasive alteration, in places replacing the entire host rock, and the brecciation encountered in the Canadian Malartic deposit are definitely obstacles to obtaining a good understanding of structural relationships inside mineralized greywackes. However, numerous structural elements allow us to constrain the onset of the porphyry intrusion late in the first tectonic event ( $D_1$ ). By its very strong spatial relationship with deeply altered, fractured rocks and ore bodies, the monzodiorite porphyry seems likely to be coeval with mineralization. There is indeed a strong need for dating the mineralizing event(s), or at least constraining its emplacement with crosscutting dykes. These observations, coupled with the potassic alteration locally, at least, related to the porphyry units are good arguments for a syn-magmatic mineralization. As stated above, the Canadian Malartic deposit shares affinities with intrusion-related gold deposits and Au-skarn replacement mineralization. There are furthermore similarities with the Boddington (Western-Australia), such as its brittle-ductile structural regime, intersecting faults and competent lithologies acting as ore control and the polyphase mineralization (Duuring *et al.*, 2007). As for Canadian Malartic, there is a need for a metal association zoning throughout the deposit, to clearly establish the lateral variance, if any.

This work has shown how 3D modeling is critical to better understanding ore deposit geology, from a structural and metallogenic point of view. The methodology presented here was proven efficient to establish a detailed reconstruction of a complex ore deposit. Much information was gathered during core logging and their integration in a basic geological model have provided major insights into the origin of the deposit.

This project should be seen as preliminary work designed to obtain a better understanding of the Canadian Malartic Archean gold deposit. The advancement made here will be of use for further research projects as there is inevitably a lot of work still needed to be made, especially on the structural settings of the Pontiac Group.

### **Acknowledgments**

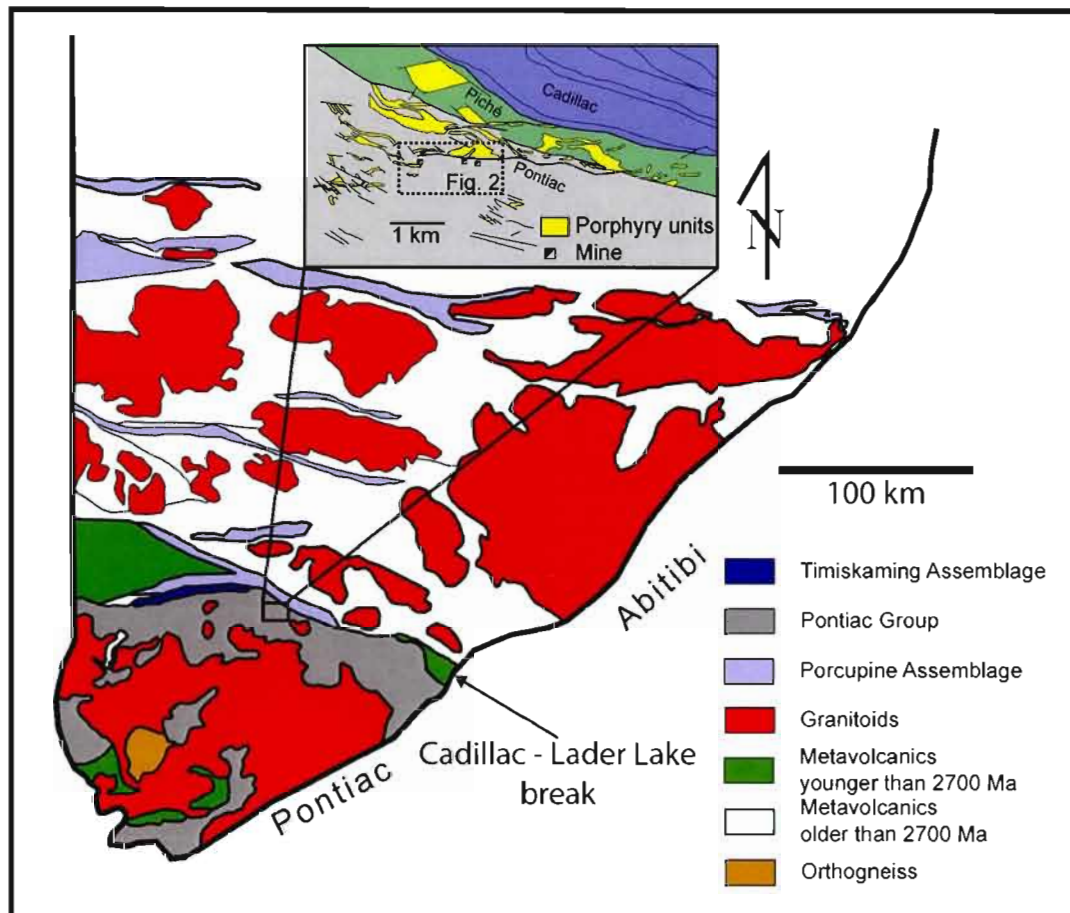
The authors thank Osisko Mining Corporation, Divex and NSERC for funding this study. A special thank to the geologists of Groupe-Conseil Cygnus for their thoughtful discussions, encouragements and advices, and to Erwann Lebrun for his work on isocon analysis. A.E. Williams-Jones and M. Gauthier have provided very constructive comments and advices, which helped to greatly improve this manuscript.

## References

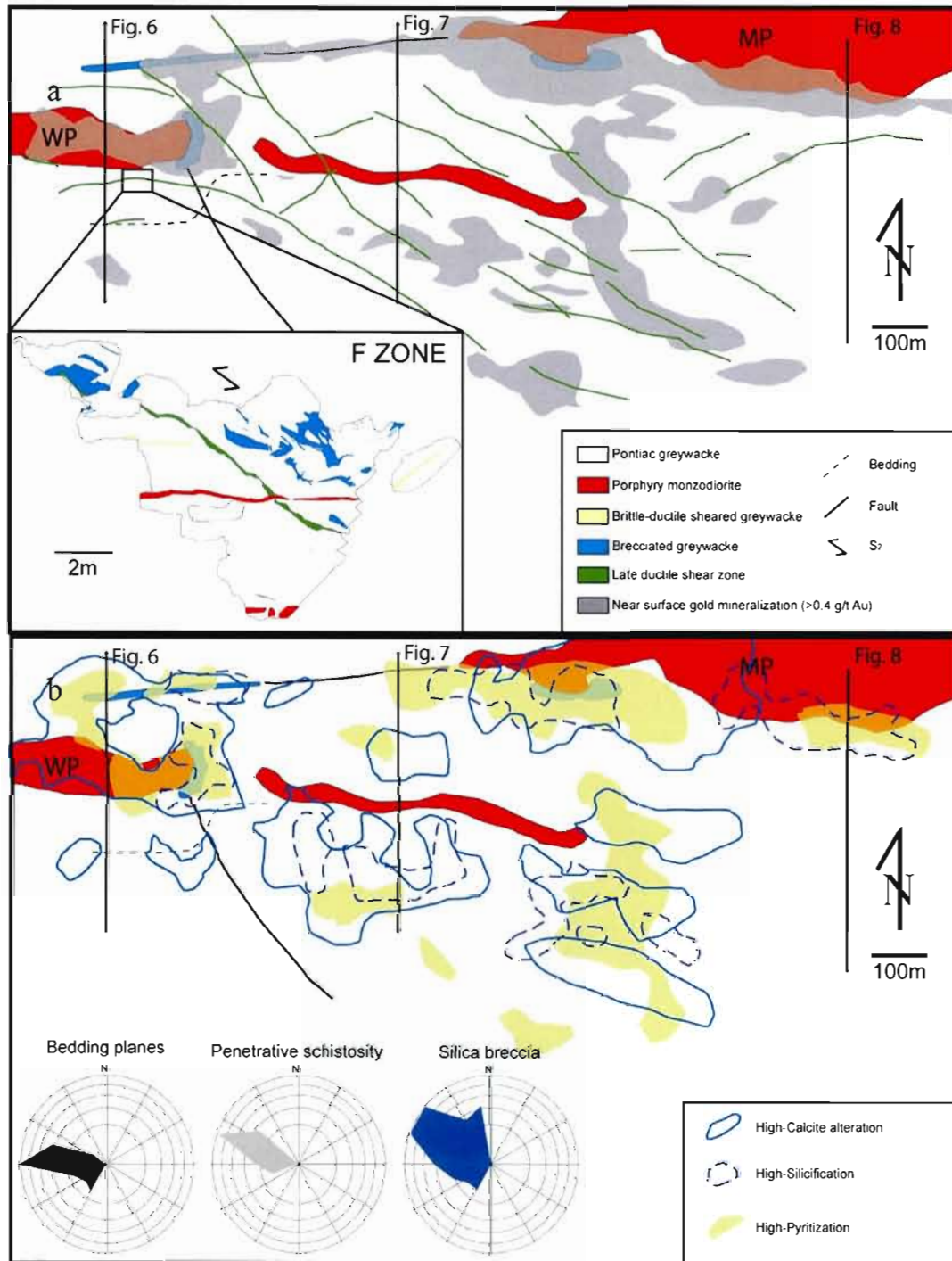
- Benn, K., 2006. Tectonic delamination of the lower crust during late Archean collision of the Abitibi – Opatika and Pontiac terranes, Superior Province, Canada. In *Archean geodynamics and environment*. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 164, 320pp.
- Benn, K., Miles, W., Ghassemi, M.R. and J. Gillet, 1994. Crustal structure and kinematic framework of the northwestern Pontiac Subprovince, Quebec; an integrated structural and geophysical study. *Canadian Journal of Earth Sciences* 31, 271-281.
- Bérubé, D., 2001. La morphologie des particules: géométrie fractale et applications environnementales. PhD thesis, Université du Québec à Montréal, 224pp.
- Calvert, A.J. and J.N. Ludden, 1999. Archean continental assembly in the southeastern Superior Province of Canada. *Tectonics* 18, 412-429.
- Davis, D.W., 2002. U-Pb geochronology of Archean metasedimentary rocks in the Pontiac and Abitibi subprovinces, Quebec, constraints on timing, provenance and regional tectonics. *Precambrian Research* 115, 97-117.
- Derry, D.R., 1939. The geology of the Canadian Malartic gold mine, N.Quebec. *Economic Geology* 34, 495-523.
- Derry, D.R. and H.C. Herz, 1948. Canadian Malartic mine in *Structural geology of Canadian ore deposits*. CIMM, Montreal, 948pp.
- Dimroth, E., Imreh, L., Goulet, N. and M. Rocheleau, 1983. Evolution of the south-central part of the Archean Abitibi Belt, Quebec. Part II: Tectonic evolution and geomechanical model. *Canadian Journal of Earth Sciences* 20, 1355-1373.
- Duuring, P., Cassidy, K.F. and S.G. Hagemann, 2007. Granitoid-associated orogenic, intrusion-related, and porphyry style metal deposits in the Archean Yilgarn Craton, Western Australia. *Ore Geology Review* 32, 157-186.
- Eakins, P.R., 1962. Caractères géologiques des gisements aurifères du district de Malartic. Ministère des Richesses Naturelles, Québec. Rapport géologique 99, 155pp.
- Fallara, F., P.S. Ross and R. Sansfaçon, 2000. Caractérisation géochimique, pétrographique et structurale: nouveau modèle métallogénique du camp minier de Malartic. Ministère des Ressources Naturelles, Québec, MB 2000-15, 155 p.
- Goldfarb, R.J., Baker, T., Dube, B., Groves, D.I., Hart, C.J.R. and P. Gosselin, 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. In *Economic Geology; one hundredth anniversary volume, 1905-2005*. Society of Economic Geologists, Littleton, 1136pp.

- Goldie, R., Kotila, B. and D. Seward, 1979. The Don Rouyn Mine; an Archean porphyry copper deposit near Noranda, Quebec . *Economic Geology* 74, 1680-1684.
- Goodman, S., Williams-Jones, A.E. and P. Carles, 2005. Structural controls on the Archean Troilus gold-copper deposit, Quebec, Canada. *Economic Geology* 100, 577-582.
- Grant, J.A., 1986. The isocon diagram; a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology* 81, 1976-1982.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Robert, F. And C.J.R Hart, 2003. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Economic Geology* 98, 1-29.
- Gunning, H.C. and J.W. Ambrose, 1940. Région de Malartic, Québec. Geological Survey of Canada, Memoir 222, 162pp.
- Hart, C.J.R., 2007. Reduced intrusion-related gold systems In *Mineral deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Geological Association of Canada, Special Publication No. 5, 95-112.
- Jébrak, M., 1997. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits : A review of mechanisms, morphology and size distribution. *Ore Geology Reviews* 12, 111-134p.
- Jébrak, M and P. Doucet, 2002. Geology and gold-molybdenum porphyry mineralisation of the Archean Taschereau – Launay plutons, Abitibi, Quebec. *Precambrian Research* 115, 329-348.
- Kerrick, R., Goldfarb, R.J. and J.P. Richards, 2005. Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework In *Economic Geology; one hundredth anniversary volume, 1905-2005*. Society of Economic Geologists, Littleton, 1136pp.
- Lang, J.R. and T. Baker, 2001. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding. *Mineralium Deposita* 36, 477-489.
- Meinert, L.D., Dipple, G.M. and S. Nicolescu, 2005. World skarn deposits In *Economic Geology; one hundredth anniversary volume, 1905-2005*. Society of Economic Geologists, Littleton, 1136pp.
- O'neil, J.J., 1934. La mine d'or Canadian Malartic, comté d'Abitibi. Service des mines, Québec, annual report, 34pp.
- Poulsen, K.H., Robert, F. And B. Dubé, 2000. Geological classification of Canadian Gold deposits. Geological Survey of Canada, bulletin 540, 106pp.

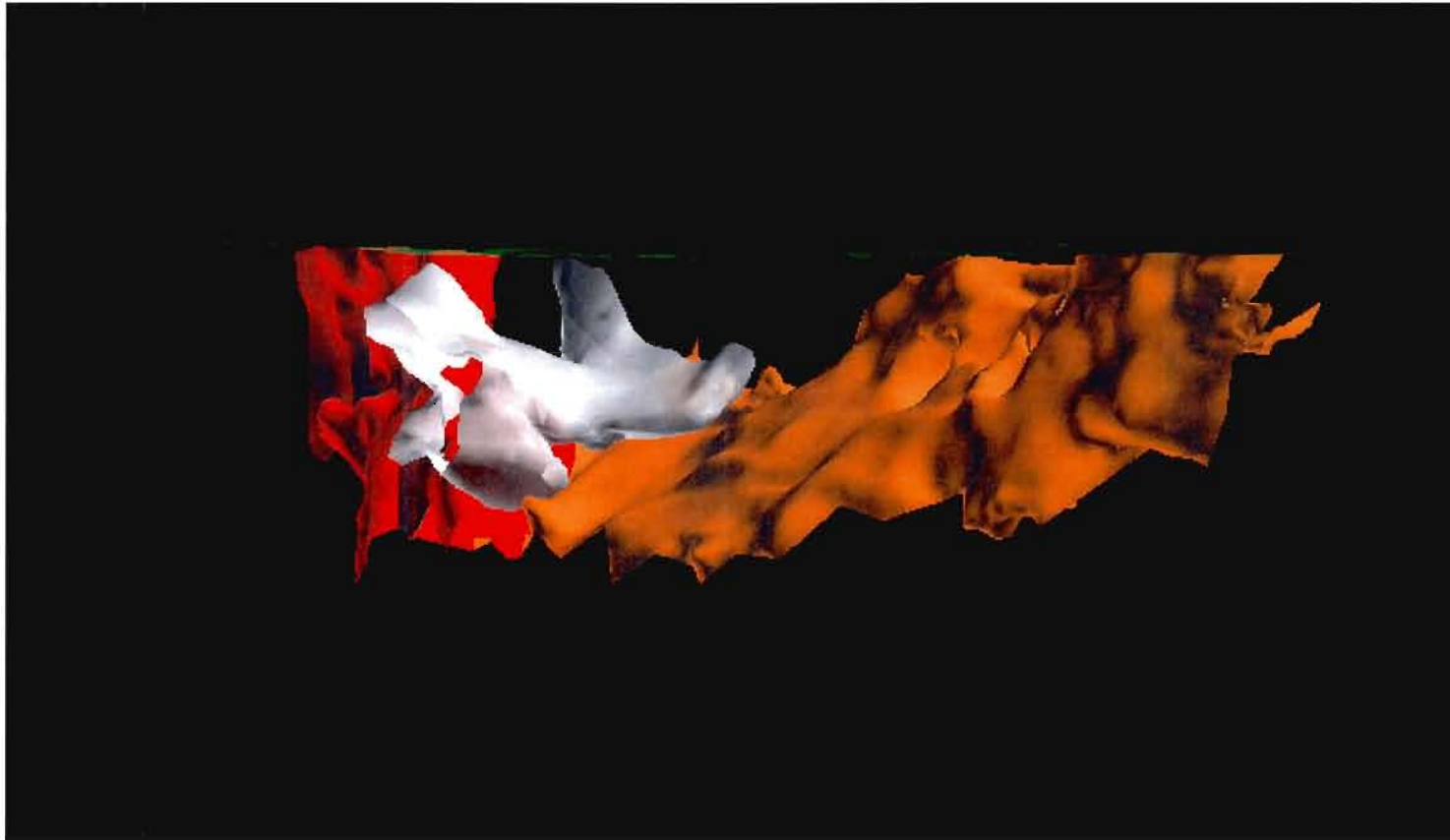
- Roth, E., 1992. The nature and genesis of Archaean porphyry-style Cu-Au-Mo mineralization, Western Australia. Unpublished Ph.D. thesis, University of Western Australia.
- Robert, F., 2001. Syenite-associated disseminated gold deposits in the Abitibi greenstone belt, Canada. *Mineralium Deposita* 36, 503-516.
- Sansfaçon, R., 1983. Étude structurale, stratigraphique et économique des formations sédimentaires et volcaniques de la région du Lac Bousquet, Comté d'Abitibi, Canton de Bousquet, Quebec. Université du Québec à Montréal, Master thesis, 166 pp.
- Sansfaçon, R., 1986. Le district de Malartic in *Structure et or, de Rouyn à Val-d'Or*, Québec. GAC-MAC field-guide vol. 14, 76pp.
- Sansfaçon, R. and C. Hubert, 1990. The Malartic gold district In *The Northwestern Quebec Polymetallic Belt: a summary of 60 years of mining exploration*. Rouyn-Noranda 1990 symposium, 203pp.
- Sillitoe, R.H., 1995. Gold-rich porphyry copper deposit: Geological model and exploration implications. Geological Association of Canada, Special Paper 40, 465-478.
- Trudel, P. and P. Sauvé, 1992. Synthèse des caractéristiques géologiques des gisements d'or du district de Malartic. Ministère de l'Énergie et des Ressources Québec, MM 89-04, 126 pp.
- Wares, R., 2005. Canadian Malartic Gold Deposit, Quebec – Three to four million ounce gold potential. ([http://www.osisko.com/pdfs/media\\_art\\_osisko\\_malartic\\_summary.pdf](http://www.osisko.com/pdfs/media_art_osisko_malartic_summary.pdf))



**Figure 1.** Regional geology of the Southeastern Superior Province (modified from Benn 2006), and a close-up of the Malartic district geological Groups and porphyry occurrences spatially related to gold deposits (modified by S.Faure from SIGEOM data). The dashed rectangle indicates the studied area, shown in figure 2.

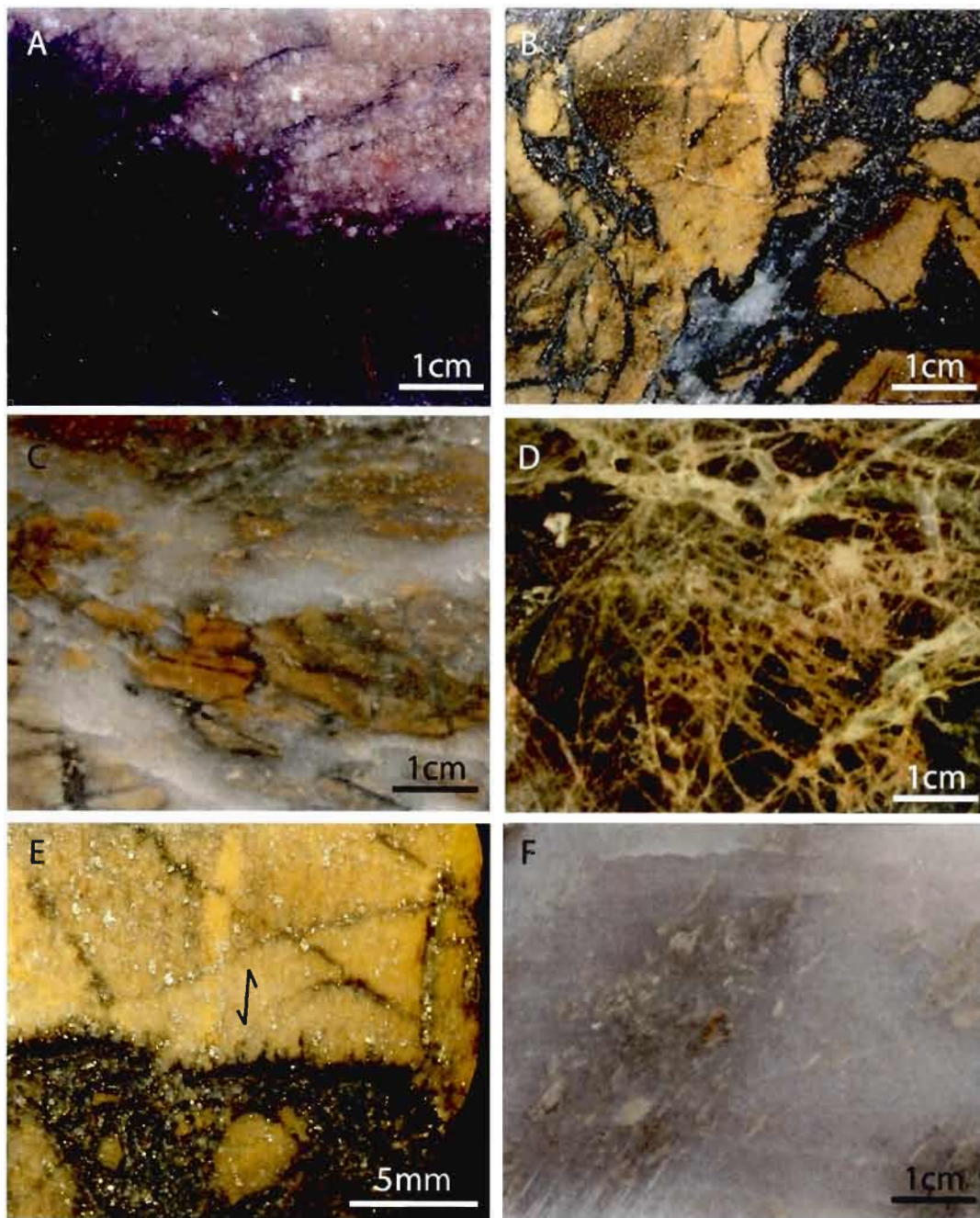


**Figure 2** Geological map of the Canadian Malartic property. **a** Near surface mineralized zones and localization of F-Zone detailed mapping. **b** Near surface zones of strong calcite, silica and pyrite alteration, and pole orientations of main structures observed.



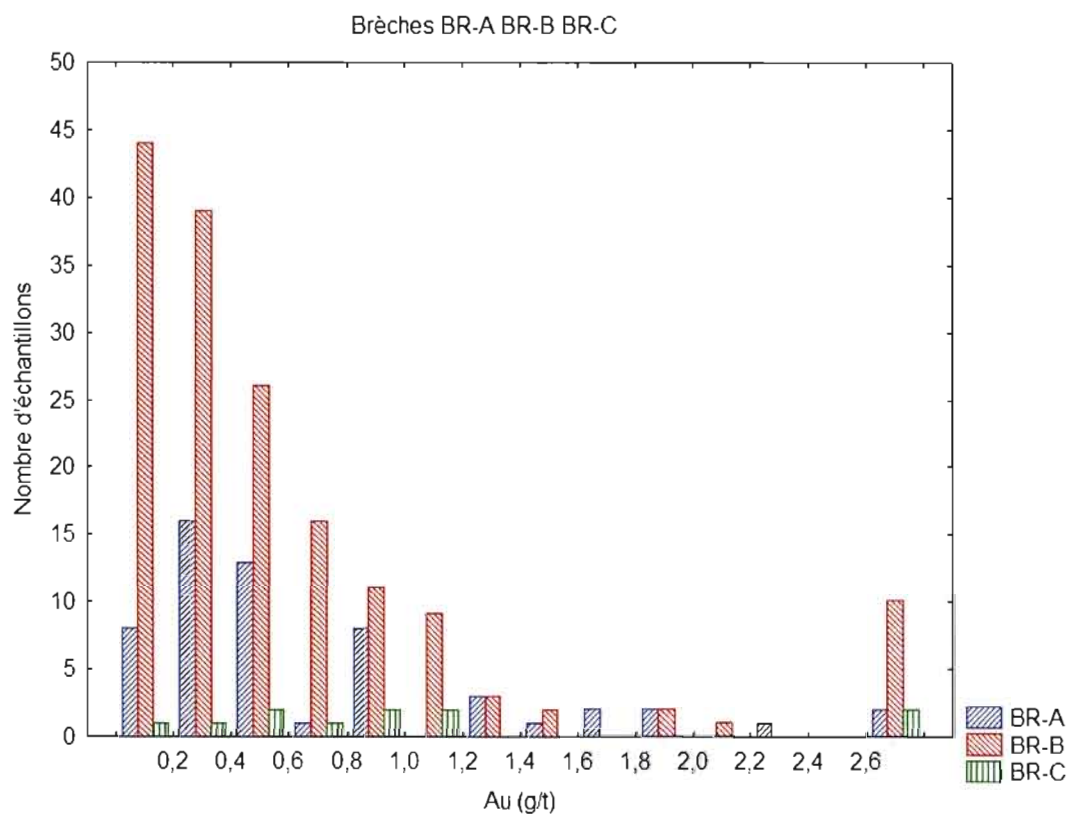
**Figure 3** Three-dimensional geometry of the Canadian Malartic monzodiorite porphyry, looking NW. Western-Porphyry is shown as the vertical red unit, as the Main-Porphyry is the inclined orange unit; in light blue is a highly replaced (REMGR) and/or brecciated brecciated greywackes (dissolution breccias, see further on the breccia section). As scale, the height of the Western-Porphyry is about 350m from surface (greenish surface).



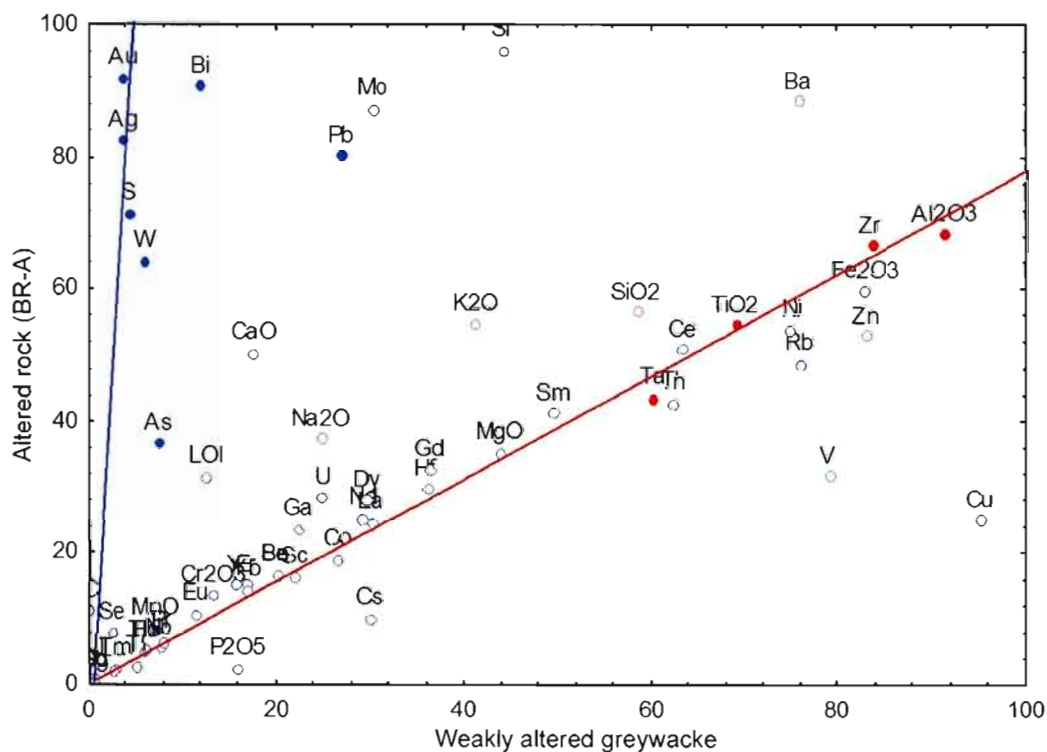


**Figure 4** Photographs of rocks illustrating structural particularities of the Canadian Malartic deposit. **a** Intrusive contact with greywacke, where the porphyry sets in deformational planes. **b** dissolution breccia with a strongly biotitic matrix and highly corroded fragments. **c** Typical silica breccia with an almost pure-quartz matrix and biotitic fragments. This specimen cross-cuts an earlier dissolution breccia similar to the one shown in (b) **d** Stockwork breccia, the stockwerk is locally very well defined, as it is sometimes only a set of veinlets and/or hairline fracture infill. **e** Close-up view of a dissolution breccia, where the

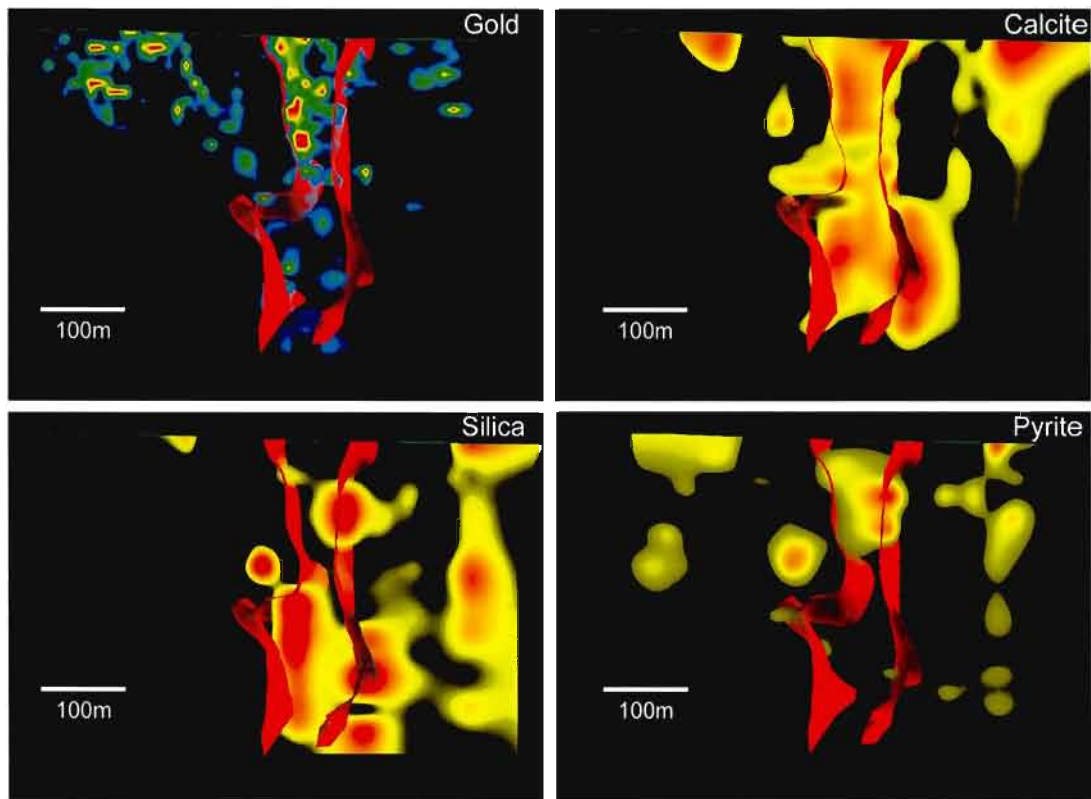
biotitic alteration clearly overprints the main schistosity inside the fragment. Pyrite also preferably infill conjugate fracture sets and minor dextral Z-folds. **f** Overprinting of silica breccia over hydraulic breccia. One can notice the difference in quartz texture and colour, as well as the clear angular and jointive fragments of the hydraulic breccia.



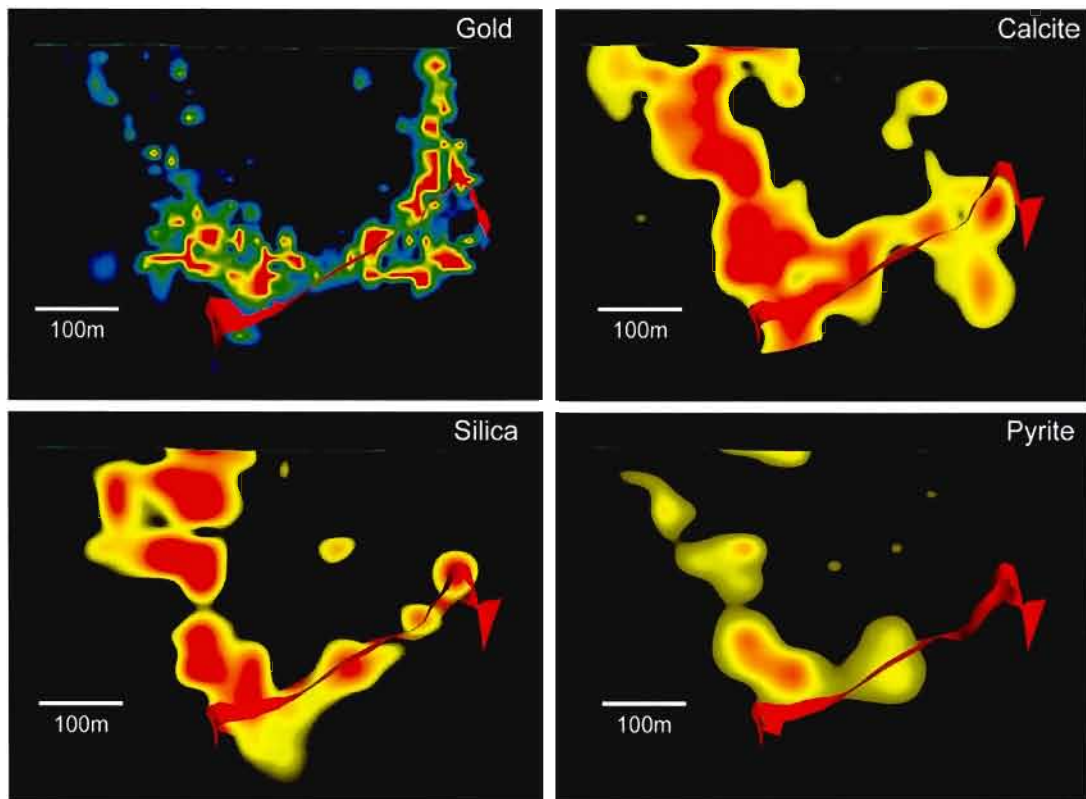
**Figure 5** Comparative histogram between different types of breccias. The great majority of dissolution breccias (BR-A) are anomalous in gold, whereas more than 50% are considered as “ore” (>0.4 g/t). Silica breccias (BR-B) tend to show a similar distribution, but weakly to unmineralized specimens are very important in total number. Stockwerk breccias (BR-C) are scarcely distributed. However, the weak number of samples may not be representative.



**Figure 6** Isocon diagram of three selected dissolution breccias; two are close to the porphyry and strongly mineralized, and one is 150m away and poor in Au. The red line represents the immobile elements whereas the blue line represents the elements associated to gold (isocon analysis was conducted using Grant (1986) method; data used for this analysis are presented in appendix A of the main author master's thesis).

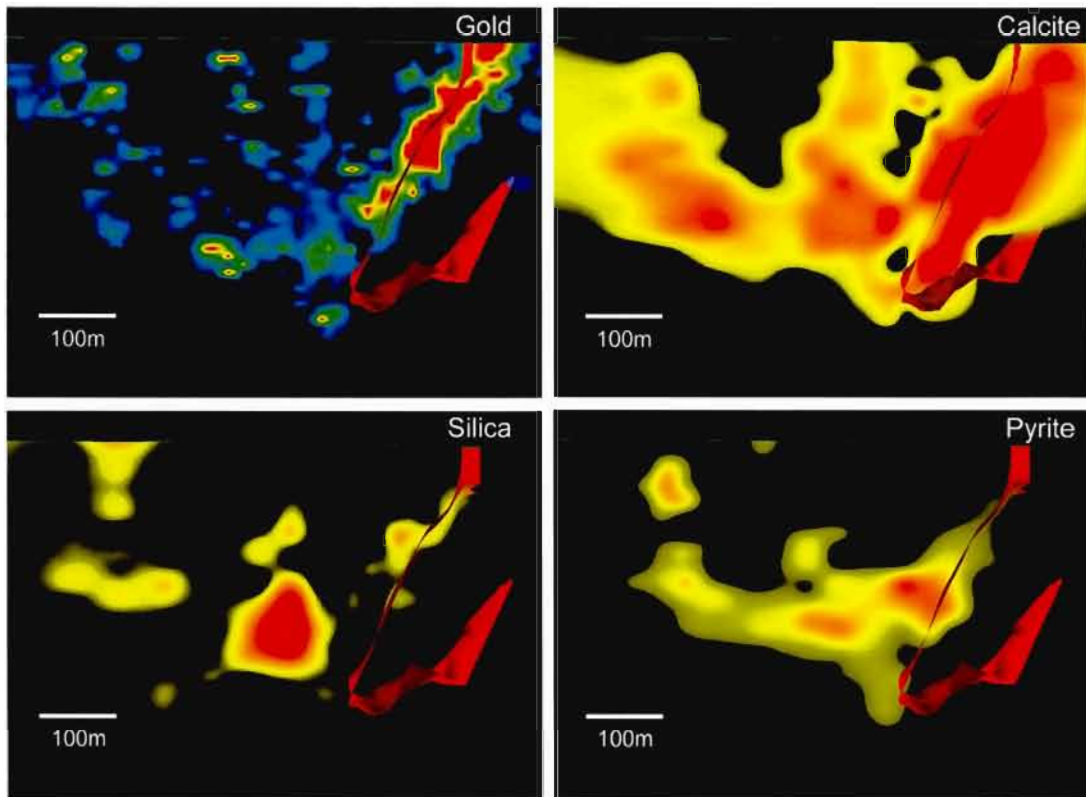


**Figure 7** Western-Porphyry contact with greywacke host rock, looking west; the intrusive unit is between the two red-coloured surfaces. The localization of this section is shown in figure 2.

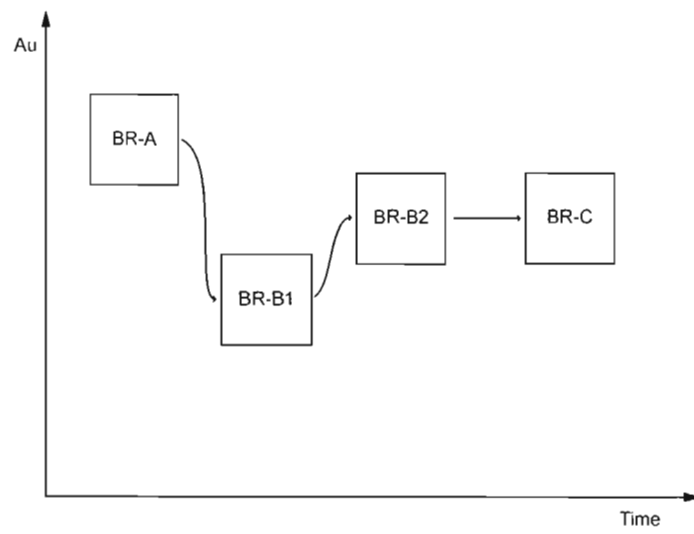


**Figure 8** Main-Porphyry contact with greywacke host rock, looking west; the intrusive unit is below the red-coloured surface. The localization of this section is shown in figure 2.





**Figure 9** Main-Porphyry contact with greywacke host rock, at its eastern tip at the junction with the Sladen fault, looking west; the intrusive unit is inside the red-coloured surface. The localization of this section is shown in figure 2.



**Figure 10** Chronology of brecciation events in the Canadian Malartic deposit.



**Table 1** Canadian Malartic breccia bodies

<b>Chronology</b>	<b>Matrix composition</b>	<b>Au grades</b>	<b>Emplacement in regard of porphyry</b>	<b>Fragment complexity</b>	<b>Process</b>
<b>1</b>	Biotite-Calcite-Pyrite±Quartz	+ Au	Scattered	++	Hydrothermal / dissolution
<b>2</b>	Silica	- Au	Scattered and contact	-	Hydraulic
<b>3</b>		- Au	Scattered and contact	+	Hydrothermal
<b>4</b>	Carbonates-Sericite-Chlorite-K feldspar stockwork	± Au	Scattered and distanced	-	Volume and/or temperature decrease

Comparative table of major breccia types encountered at Canadian Malartic. Note that the processes are the last that occurred; early fracturing may acted as a preferred zone for brecciation.

**Table 2** Principal characteristics of gold deposit types

	Au Porphyry	Intrusion-related gold	Au skarn	Orogenic	Canadian Malartic
Pluton	Oxydized diorite / syenite	Reduced Granite	Reduced diorite, granodiorite	Any	Monzodiorite
Host-rocks	Any	Reduced environment	Clastic-rich rocks, limestone	Any	Greywacke, monzodiorite
Geochemistry (+ Au)	Cu, Mo	Bi, W, As, Mo, Te, Sb	Bi, W, Te, As, Co	As, W, Te, Bi	Ag, Bi, Te, W
Structure	Stockwork	Stockwork, veins	Replacement	Shear zone, veins	Replacement, breccia, veins, stockwork
Mineralogy	Hm, Mg, Cp, Py, sulphates	Apy, Py, Po	Cp, Bo, Ch, Apy, Po, Py	Apy, St, Ms, Py	Py, minor Mo and Cp
Alteration	Biotite, albite	Carbonates	Fe-rich px, Gn, k-felspar	Albite, carbonates	Silica, k-felspar, Hm, calcite, biotite
Examples	Fort Knox (AK), Ajax (BC)	Pogo (AK), Muruntau (Uz), Tighza (Morocco)	Ertzberg (NG), Ok Tedi (PNG), Navachab (Namibia)	Sigma (Qc), Yellowknife (NWT)	
References	Sillitoe (1995)	Lang and Baker (2001), Hart (2007)	Meinert <i>et al.</i> (2005)	Groves <i>et al.</i> (2003)	This study, Trudel and Sauvé (1992)

**Abbreviations** Hm: Hematite; Mg: Magnetite; Apy: Arsesopyrite; Py: pyrite; Po: Pyrotite; Cp: Chalcopyrite; Bo: Bornite; Ch: Chalcocite; St: Stibine; Ms: Muscovite; Px: Pyroxene; Gn: Garnet. Ak: Alaska; BC: British Columbia; Uz: Uzbekistan; NG : New Guinea; PNG: Papua New Guinea; Qc: Quebec; NWT: North-Western Territories.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Suite aux travaux de terrain, de descriptions de forages carottés et de modélisation tridimensionnelle, plusieurs progrès ont été réalisés quant à la compréhension du gisement de Canadian Malartic. L'hypothèse de base, soit qu'il s'agisse d'un gisement porphyrique archéen, n'est pas absolument démontrée. Nous savons par contre que la monzodiorite porphyrique s'est mise en place tardivement par rapport au premier épisode de déformation ( $D_1$ ), que des corps bréchiques à caractère chimique influencent la minéralisation, que ces dernières sont recoupées par des brèches hydrauliques et qu'il y a fort probablement plus d'un événement minéralisateur. De plus, la forte association spatiale entre le porphyre-ouest (WP) et les différents types d'altération, la minéralisation et les brèches laissent entendre une minéralisation syn-magmatique. Plusieurs évidences nous indiquent d'ailleurs des similitudes avec les gisements associés aux intrusions (*intrusion-related gold*; Lang et Baker, 2001) et avec les skarns aurifères (Meinert *et al.*, 2005). Dans le détail, le gisement de Boddington (Western Australia) partage plusieurs affinités avec Canadian Malartic : un régime structural ductile-cassant, un contrôle de la minéralisation par l'intersection de failles et par des roches compétentes, ainsi qu'une genèse polyphasée des gisements (Duuring *et al.*, 2007).

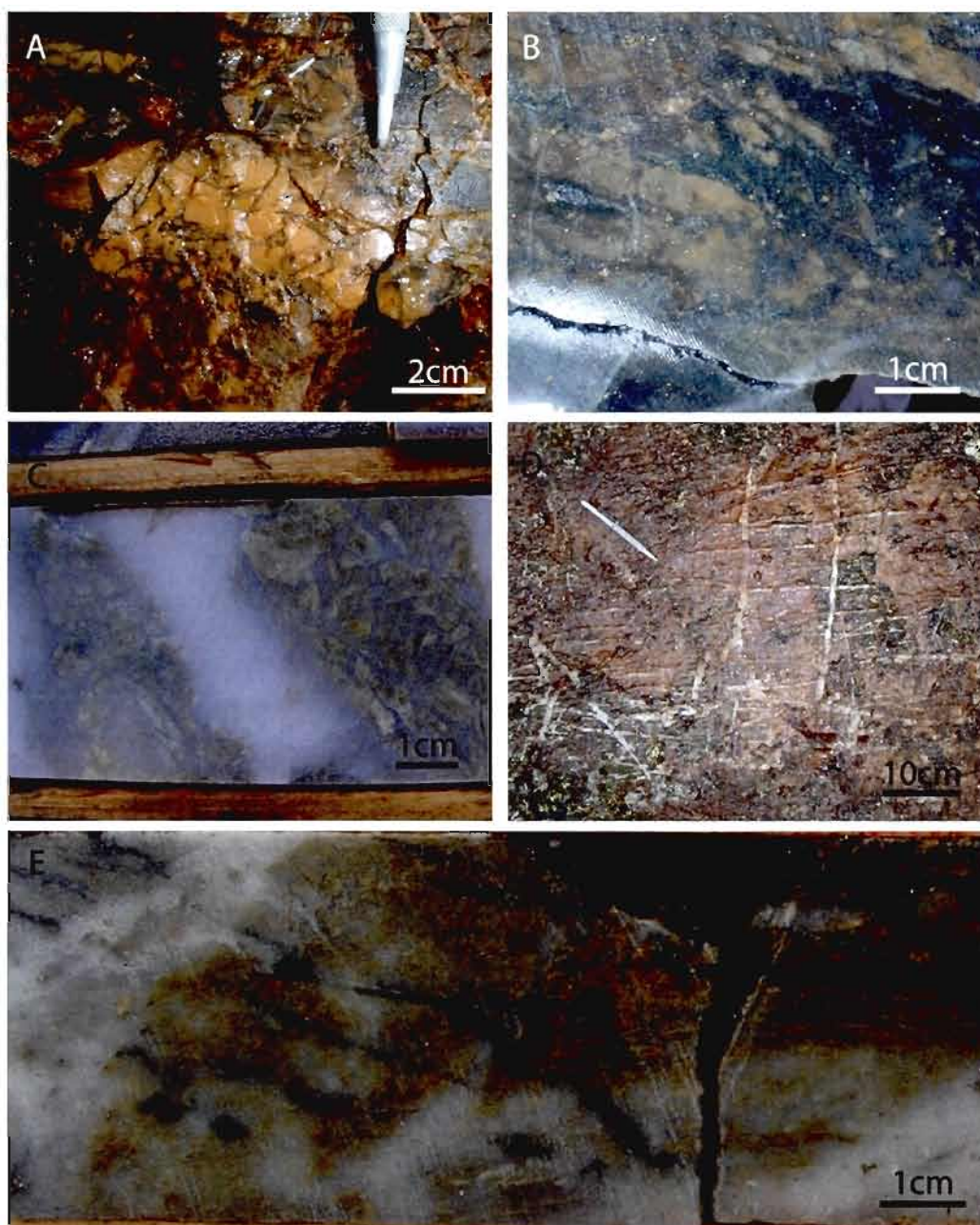
D'un point de vue méthodologique, il a été démontré que la modélisation tridimensionnelle d'un gisement métallifère peut s'avérer un outil fort utile pour la géologie structurale et la répartition de l'altération. La reconstruction détaillée à l'aide des données de centaines, voire de milliers, de forages fournit un apport majeur à la compréhension métallogénique d'un gisement. Dans le cas de Canadian Malartic, il reste beaucoup de travail à faire pour bien comprendre sa genèse. À l'aide des milliers de mètres de carottes disponibles, une étude structurale approfondie du Groupe de Pontiac pour compléter les travaux existants est requise. De plus, il serait primordial de dater les phases de minéralisation et vérifier si elles coïncident ou non avec la mise en place du porphyre. Finalement, une étude sur la zonalité des associations métallifères permettrait de conclure s'il y a un appauvrissement des fluides hydrothermaux dans une direction donnée, et de potentiellement trouver la source des fluides.

## Références

- Duuring, P., Cassidy, K.F. et S.G. Hagemann, 2007. Granitoid-associated orogenic, intrusion-related, and porphyry style metal deposits in the Archean Yilgarn Craton, Western Australia. *Ore Geology Review* 32, 157-186.
- Lang, J.R. et T. Baker, 2001. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding. *Mineralium Deposita* 36, 477-489.
- Meinert, L.D., Dipple, G.M. et S. Nicolescu, 2005. World skarn deposits In *Economic Geology; one hundredth anniversary volume, 1905-2005*. Society of Economic Geologists, Littleton, 1136pp.

## APPENDICE A

### COMPILATION ET CLASSIFICATION DES BRÈCHES DE CANADIAN MALARTIC



Photographies complémentaires des brèches de Canadian Malartic **A** Brèche de dissolution (BR-A) ; échantillon prélevé sur la zone F. **B** Brèche de dissolution (BR-A). **C** Surimpression d'une brèche à silice (BR-B2) sur une première phase de bréchification hydraulique (BR-B1). **D** Bréchification hydraulique ; Zone Gouldie, à quelques centaines de mètres au sud de Canadian Malartic, à proximité d'un intrusif porphyrique. **E** Possibilité de triple bréchification : les fragments brunâtres semblent avoir été reliques d'une brèche de dissolution, ayant subi une fracturation hydraulique, elle-même ayant été rebréchifiée.



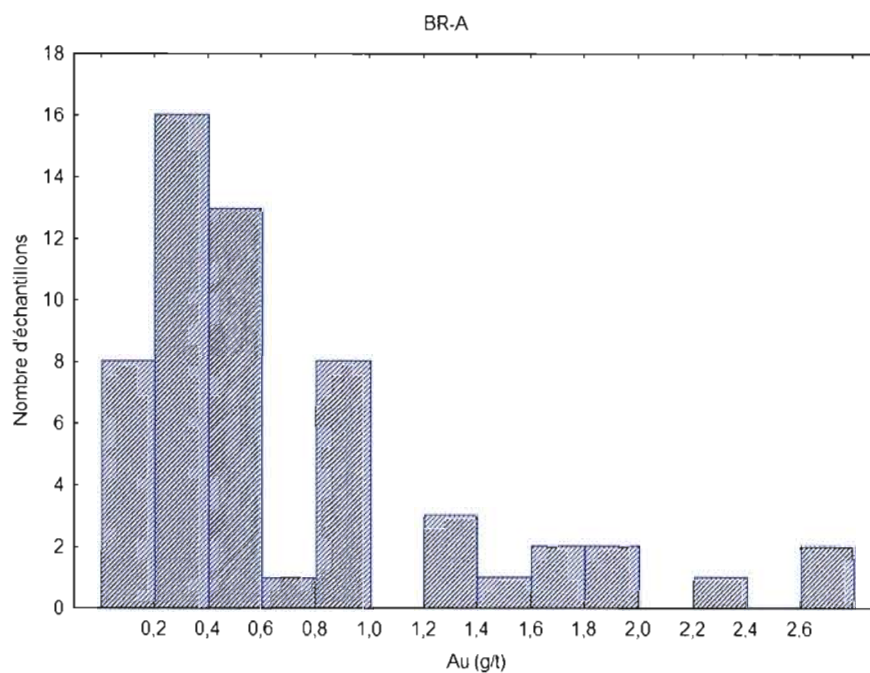


Diagramme de distribution des valeurs en or pour les brèches de dissolution (BR-A)

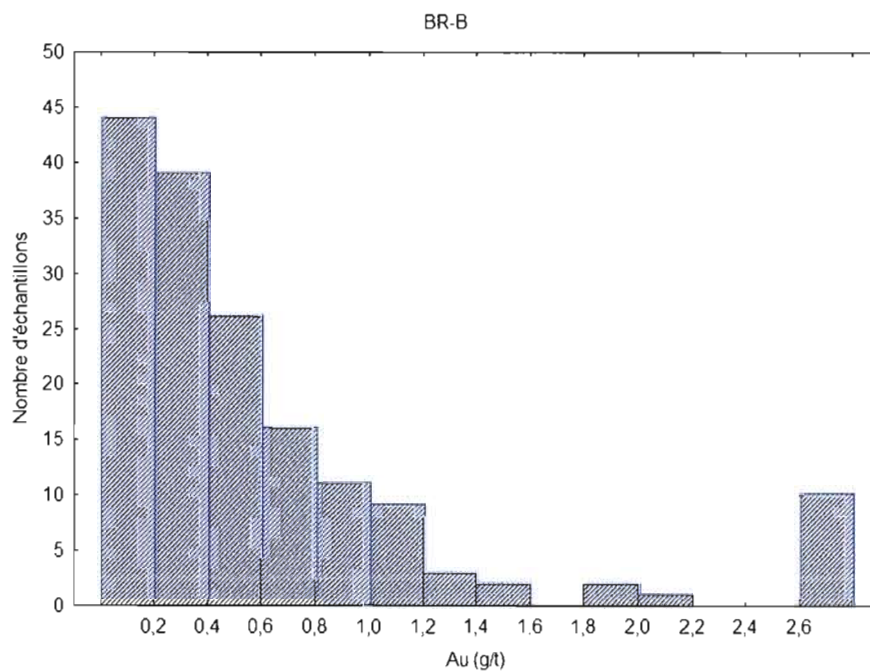


Diagramme de distribution des valeurs en or pour les brèches à silice (BR-B)

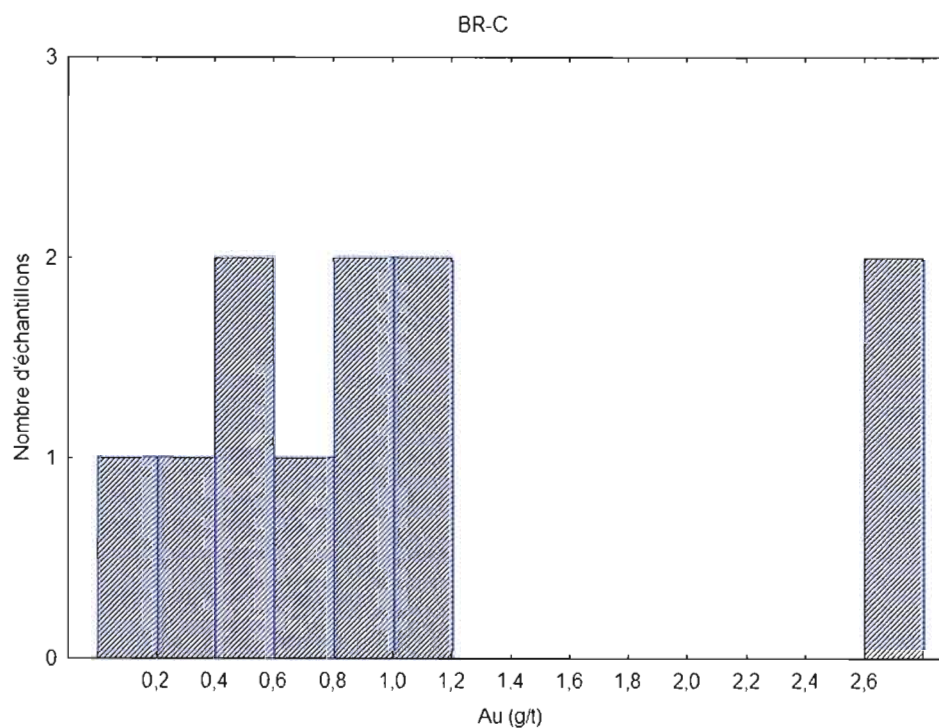
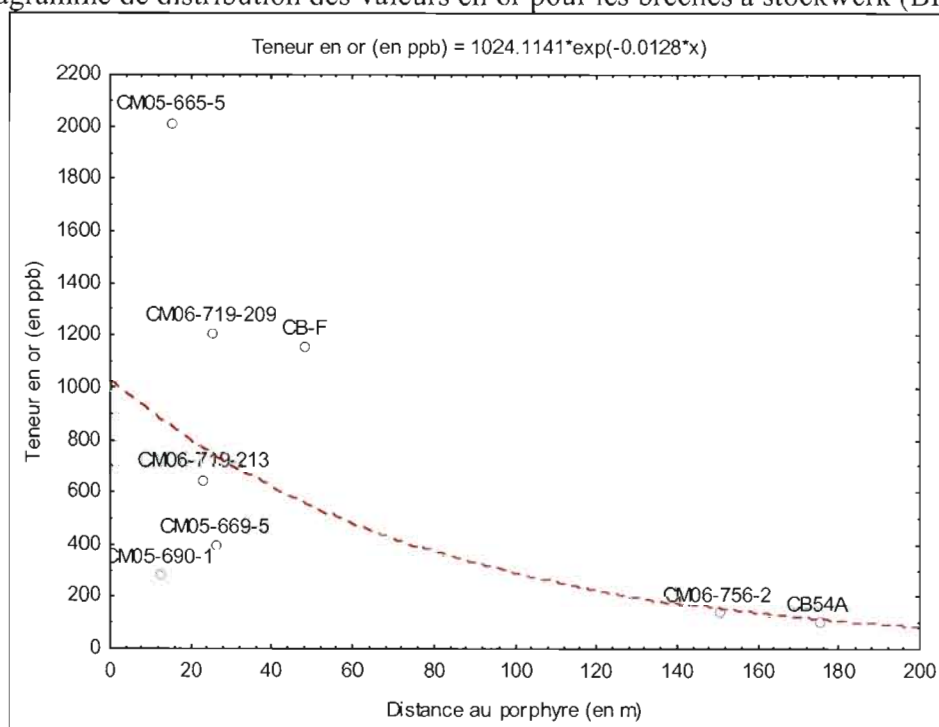


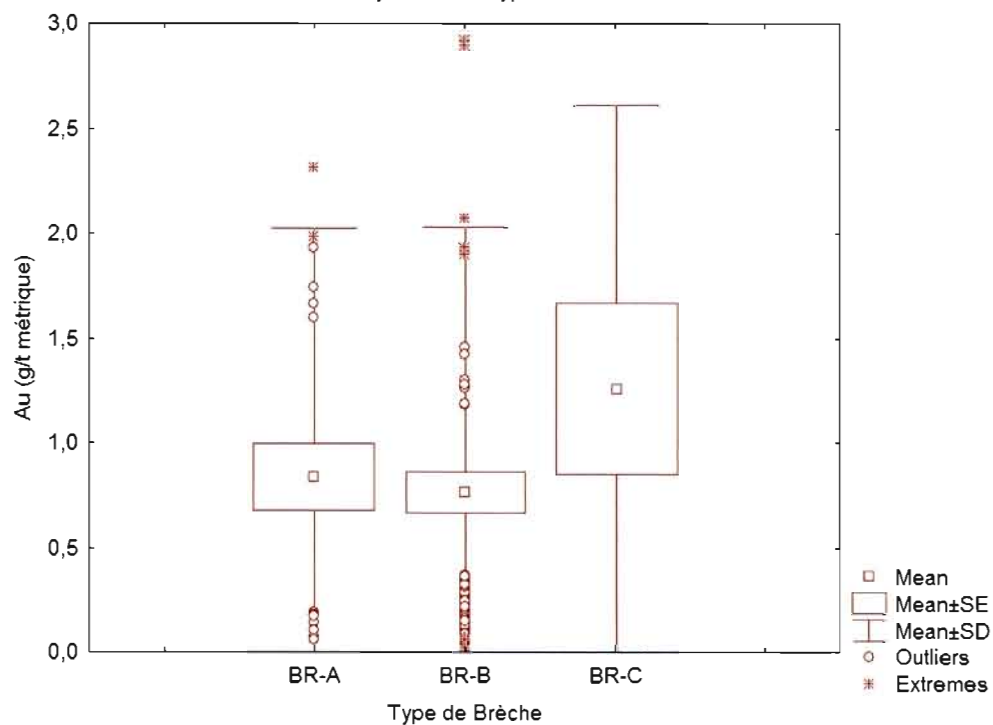
Diagramme de distribution des valeurs en or pour les brèches à stockwerk (BR-C)



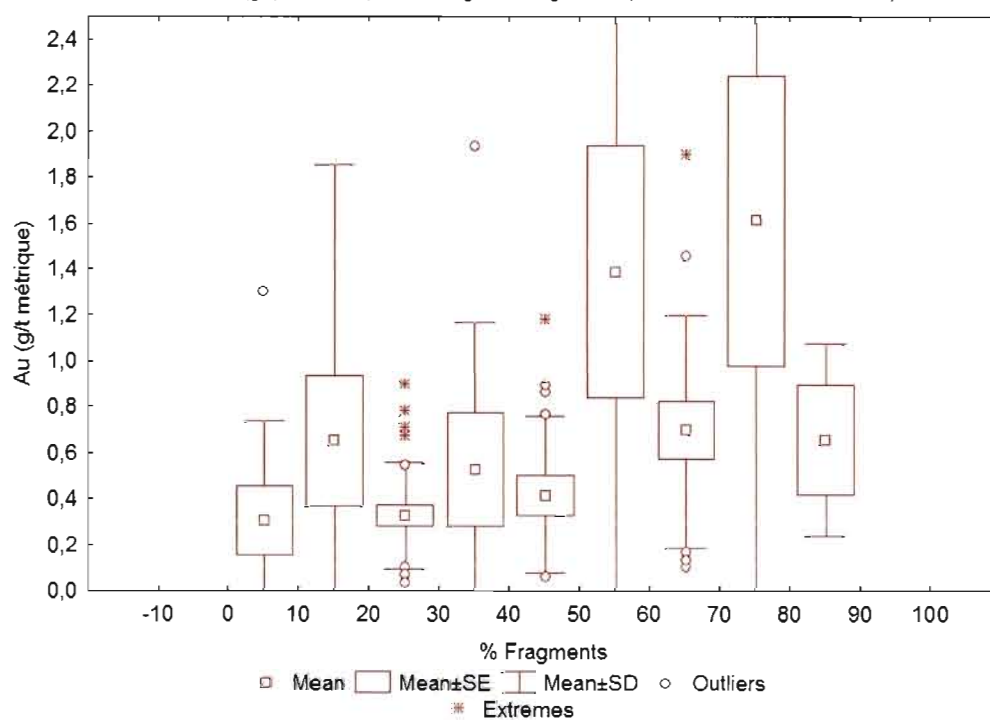
Teneur en or de brèches par rapport à leur distance au porphyre



### Teneurs en or moyennes des types de brèche



Teneur en or (g/t) selon le pourcentage de fragments (brèches à matrice de silice)



Compilation des zones de brèches : Types de matrices vs. Positionnement structural

Matrice	Brèches isolées (grauwacke)	Brèches au contact du porphyre	Brèches au contact d'un dyke	Brèches isolées (porphyre)	TOTAL
(1) Silice	24	19	20	8	71
(2) Quartz-Calcite- Biotite-Pyrite	12	0	5	0	17
(3) Double bréchification (1+ 2)	5	5	2	1	13
(4) Carbonates±Chlorite± (Feldspath K)	4	0	1	0	5
(5) Brèches atypiques	12	1	1	0	14
TOTAL	57	25	29	9	120

Compilation des paramètres morphométriques des séquences bréchiques

# FORAGE	# BRÈCHE	Complexité	Arrondissement	Allongement	Fabrique	Dilatation	Granulométrie
CM05-696	1	4	4	7	2	0	3
CM05-696	2	2	4	3	2	2	4
CM06-695	1	7	4	4	2	5	6
CM05-684	1	1	3	2	6	1	5
CM06-690	1	6	2	4	4	3	4
CM06-705	1	3	2	6	2	3	5
CM06-705	2	3	2	6	2	3	5
CM06-705	3	2	0	1	8	0	0
CM06-705	4	2	0	1	8	0	0
CM06-705	5	5	3	2	2	4	5
CM06-705	6	3	1	7	1	1	2
CM06-705	7	6	4	1	4	4	2
CM06-705	8	4	3	3	4	2	1
CM06-702	1	5	2	1	5	3	2
CM06-702	2	7	1	4	4	6	6
CM06-702	3	2	0	1	2	2	7
CM06-702	4	2	1	4	3	3	7
CM06-702	5	8	1	2	6	4	2
CM06-701	1	6	2	6	3	3	5
CM06-701	2	4	4	3	2	3	4
CM06-701	3	4	3	5	1	2	4
CM06-701	4	6	3	4	3	3	2
CM06-701	5	7	1	2	2	3	5
CM06-701	6	7	1	3	4	2	2
CM06-701	7	5	2	2	2	1	3
CM06-701	8	4	3	2	2	4	3

# FORAGE	#	Complexité	Arrondissement	Allongement	Fabrique	Dilatation	Granulométrie
CM06-701	9	4	1	3	2	2	8
CM05-665	1	3	3	4	2	4	3
CM05-665	2	2	1	2	6	1	2
CM05-665	3	3	3	6	3	2	6
CM05-665	4	2	0	2	4	3	6
CM05-665	5	3	0	3	4	2	5
CM05-665	6	3	1	4	3	2	4
CM05-665	7	7	3	3	2	3	4
CM05-665	8	4	0	2	8	3	2
CM05-665	9	5	0	3	2	2	3
CM05-669	1	6	2	4	5	3	6
CM05-669	2	3	1	6	2	2	2
CM05-669	3	5	0	2	7	3	1
CM05-669	4	6	2	8	1	4	6
CM05-669	5	5	1	6	2	2	4
CM05-669	6	4	1	5	2	2	3
CM06-700	1	7	1	2	4	2	6
CM06-700	2	7	1	5	6	4	7
CM06-700	3	5	2	4	3	3	5
CM06-700	4	8	1	4	2	3	6
CM06-700	5	4	1	2	3	1	3
CM06-700	6	8	0	5	1	5	5
CM06-698	1	5	0	2	6	8	1
CM06-698	2	4	2	7	2	5	6
CM06-698	3	6	2	2	3	2	7
CM06-698	4	5	5	5	2	7	3
CM06-698	5	4	3	2	4	6	3
CM06-697	1	2	0	2	2	1	6
CM06-717	1	1	0	3	1	1	8
CM06-717	2	5	2	1	6	5	9
CM06-717	3	3	1	3	2	3	5

# FORAGE	#	Complexité	Arrondissement	Allongement	Fabrique	Dilatation	Granulométrie
CM06-717	4	4	1	2	5	5	8
CM06-725	1	4	3	2	5	6	5
CM06-725	2	4	2	1	3	5	3
CM06-802	1	3	3	3	2	4	6
CM06-802	2	4	3	4	2	1	2
CM06-802	3	6	3	5	1	1	0
CM06-802	4	5	3	1	3	3	2
CM06-728	1	8	4	6	1	3	5
CM06-776	1	0	0	1	2	2	1
CM06-756	1	3	0	1	5	1	8
CM06-756	2	5	3	3	4	2	5
CM06-756	3	5	2	4	2	2	7
CM06-777	1	4	1	5	2	1	2
CM06-787	1	6	2	4	2	2	1
CM06-778	1	4	2	3	3	3	5
CM06-778	2	5	3	4	5	4	6
CM06-778	3	6	3	2	6	2	2
CM06-804	1	3	0	5	3	2	4
CM06-804	2	5	4	3	6	5	5
CM06-804	3	4	3	3	1	2	8
CM06-804	4	4	4	6	2	2	2
CM06-767	1	5	3	3	5	1	5
CM06-758	1	5	4	4	4	2	3
CM06-758	2	6	4	2	6	2	4
CM06-758	3	5	6	1	7	5	2
CM06-755	1	4	5	1	8	2	9
CM06-755	2	0	0	0	0	0	0
CM06-755	3	6	6	3	8	1	10
CM06-755	4	6	3	4	3	4	7
CM06-755	5	4	5	4	2	2	8
CM06-755	6	5	5	2	3	3	8

Analyses géochimiques roches totales par ICP-MS d'échantillons de brèches (analyses isocones)

	CB-F	CB54A	CM09-995 (r.mère)	CM06-756- 2	CM06-719- 213	CM06-719- 209	CM05-690- 1	CM05-669- 5	CM05-665- 5	Seuil analytique	Unité
SiO2	54,62	79,44	58,4	51,88	88,03	75,39	92,52	71,75	62,84	0,01	%
Al2O3	15,53	7,28	18,27	14,77	3,61	8,8	1,75	8,98	10,7	0,01	%
Fe2O3	4,4	3,06	7,54	6,39	2,71	3,76	1,56	3,59	5,48	0,04	%
MgO	2,56	0,97	3,65	3,37	0,13	1,03	0,25	1,49	2,85	0,01	%
CaO	4,62	1,58	1,76	6,15	1,16	1,73	1,12	2,28	4,29	0,01	%
Na2O	3,36	2,38	2,48	4,87	0,52	2,29	0,07	2,94	2,94	0,01	%
K2O	7,44	2,36	4,12	4,6	2,3	3,63	1,3	3,37	4,33	0,01	%
TiO2	0,57	0,25	0,69	0,59	0,13	0,35	0,07	0,3	0,47	0,01	%
P2O5	0,02	0,01	0,16	0,02	0,01	0,01	0,005	0,03	0,03	0,01	%
MnO	0,09	0,03	0,07	0,09	0,03	0,03	0,02	0,05	0,07	0,01	%
Cr2O3	0,029	0,013	0,029	0,034	0,008	0,018	0,005	0,017	0,025	0,002	%
Sc	15	6	22	22	2	7	2	8	12	1	PPM
LOI	6,4	2,5	2,5	6,9	1,3	2,8	1,3	5	5,6	-5,1	%
Ba	790	511	682	1024	306	495	204	626	574	1	PPM
Be	2	0,5	2	1	0,5	0,5	0,5	2	2	1	PPM
Co	14,2	9,8	26,5	23,6	6,1	13,2	3,3	10,3	18,7	0,2	PPM
Cs	1	0,7	3	0,6	0,2	0,2	0,05	0,1	1,4	0,1	PPM
Ga	21,6	11,6	22,3	31,2	5,4	11,3	3,4	14,8	17,7	0,5	PPM
Hf	2,8	1,4	3,6	3,5	0,8	1,8	0,4	1,9	2,6	0,1	PPM
Nb	5,6	3	7,5	6	1,4	3,2	1,5	3,7	4,8	0,1	PPM
Rb	86	34,5	113,9	54,7	28,5	39,5	15	38,2	78	0,1	PPM
Sn	1	0,5	2	2	2	0,5	0,5	1	2	1	PPM
Sr	689,1	377	310,1	616,2	121,2	295,4	82,8	520,1	713,4	0,5	PPM
Ta	0,4	0,2	0,6	0,5	0,1	0,3	0,05	0,3	0,4	0,1	PPM
Th	7,7	3,6	8,9	6,5	1,5	4	1,7	3,6	4,1	0,2	PPM
U	1,6	8,3	2,5	5,8	0,6	1	3,1	4,5	1,1	0,1	PPM
V	89	24	158	42	12	54	4	27	59	8	PPM
W	40,5	10,4	3	32,2	7,7	18,8	5	26,2	23,4	0,5	PPM
Zr	95,3	49,2	125,3	114,8	24,6	60,2	10,9	72,5	89,9	0,1	PPM

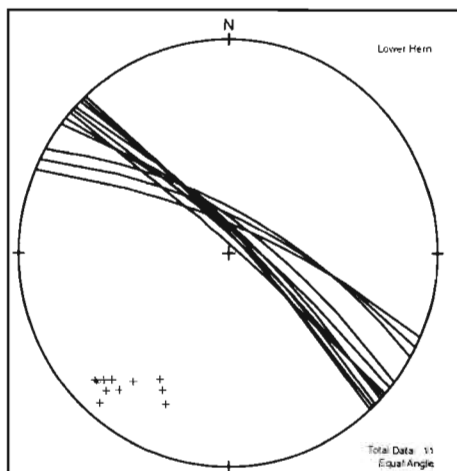
	CB-F	CB54A	CM09-995 (r.mère)	CM06-756- 2	CM06-719- 213	CM06-719- 209	CM05-690- 1	CM05-669- 5	CM05-665- 5	Seuil analytique	Unité
Y	15,6	4,7	15,8	20,7	2,9	7,3	2,6	6,9	9,1	0,1	PPM
La	23,1	12,8	30,2	31,8	5,7	14,7	2,3	16,1	18,7	0,1	PPM
Ce	49,2	24,1	63,3	63,1	11,3	31,3	5,3	31,3	39,9	0,1	PPM
Pr	6,13	2,94	7,7	7,83	1,4	3,88	0,67	3,89	5	0,02	PPM
Nd	24,8	11,5	29,3	31	5,8	15,4	2,9	15,5	19,9	0,3	PPM
Sm	4,15	1,79	4,95	4,86	0,88	2,58	0,55	2,38	3,36	0,05	PPM
Eu	1,08	0,43	1,14	1,31	0,23	0,61	0,17	0,59	0,81	0,02	PPM
Gd	3,44	1,27	3,62	3,7	0,68	1,83	0,46	1,63	2,63	0,05	PPM
Tb	0,51	0,18	0,57	0,63	0,1	0,27	0,08	0,25	0,37	0,01	PPM
Dy	2,8	0,86	2,97	3,79	0,52	1,24	0,46	1,38	1,8	0,05	PPM
Ho	0,53	0,17	0,6	0,7	0,1	0,25	0,08	0,26	0,31	0,02	PPM
Er	1,53	0,47	1,7	2,14	0,25	0,75	0,24	0,74	0,85	0,03	PPM
Tm	0,25	0,09	0,28	0,34	0,05	0,13	0,04	0,13	0,12	0,01	PPM
Yb	1,46	0,57	1,7	1,98	0,25	0,79	0,18	0,77	0,83	0,05	PPM
Lu	0,22	0,08	0,26	0,28	0,05	0,13	0,03	0,11	0,13	0,01	PPM
C	1,07	0,33	0,01	1,32	0,27	0,4	0,26	1,13	0,97	0,02	%
S	1,8	1,31	0,17	3,89	1,04	1,89	0,51	1,82	2,88	0,02	%
Mo	5	5,7	3,8	24,3	10,5	14,7	43,5	71,7	3,4	0,1	PPM
Cu	7,3	17,6	31,7	5,6	6	31,4	7,4	5,8	12,1	0,1	PPM
Pb	4,1	366,2	5,4	35,4	68,3	18,9	74,4	49,8	8,6	0,1	PPM
Zn	50	39	83	66	20	30	13	27	42	1	PPM
Ni	52,9	45,1	112,5	97,7	28,7	64,7	11,1	54,2	91	0,1	PPM
As	2,6	0,6	0,25	0,25	0,7	0,5	0,25	0,25	0,8	0,5	PPM
Cd	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05	0,1	0,2	0,1	PPM
Sb	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	PPM
Bi	0,5	14,6	0,3	3	3,8	1,6	5,3	1,1	3,3	0,1	PPM
Ag	1,2	6,6	0,05	0,6	2	3,4	1	2,2	1,5	0,1	PPM
Au	1156	100,5	43,2	136,5	646,8	1207,9	279	397,7	2013	0,5	PPB
Hg	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,01	PPM
Tl	0,2	0,2	0,5	0,2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,4	0,1	PPM
Se	0,25	1	0,25	1,1	0,25	0,6	0,25	0,6	1	0,5	PPM

## APPENDICE B

### STÉRÉONETS DES CISAILLEMENTS DUCTILES TARDIFS

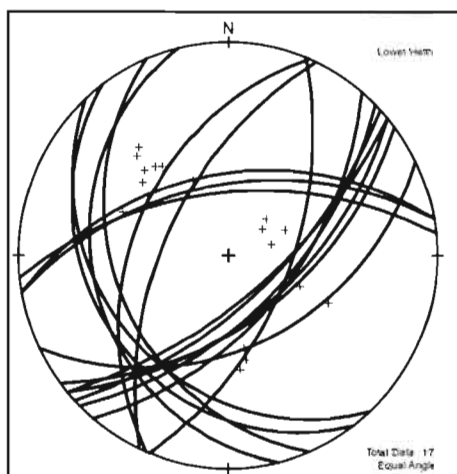
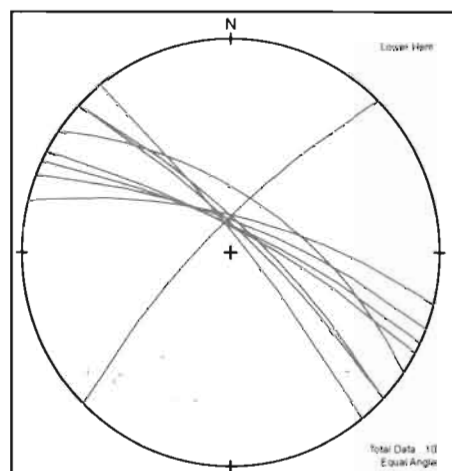


## Contact SCH

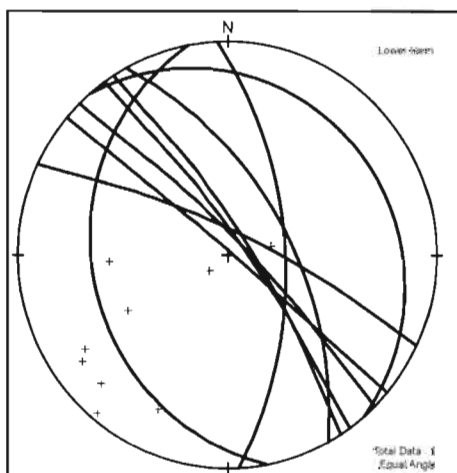
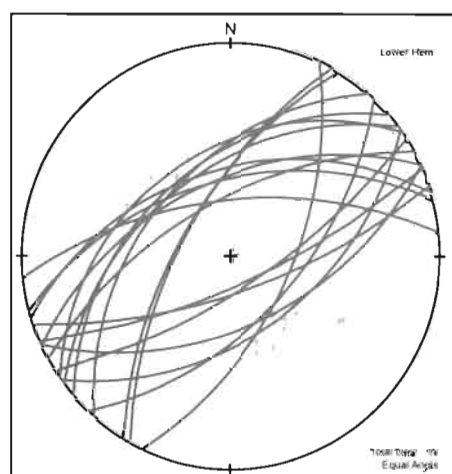


CM06-686

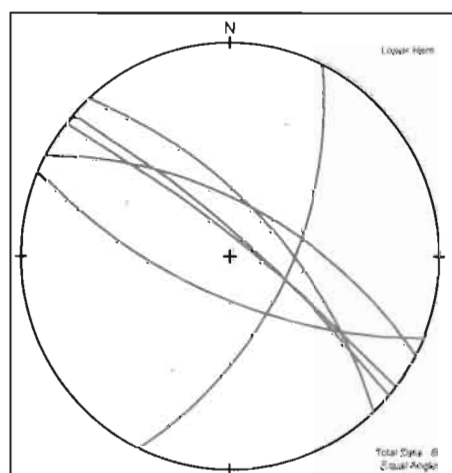
## Schistosité SCH



CM06-687

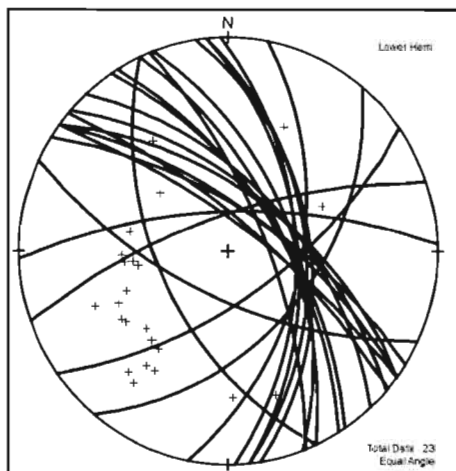


CM06-693

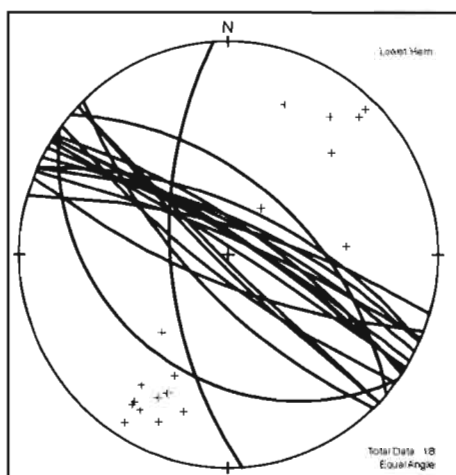
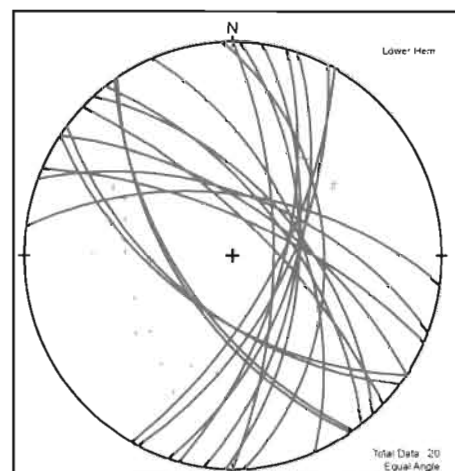


## Contact SCH

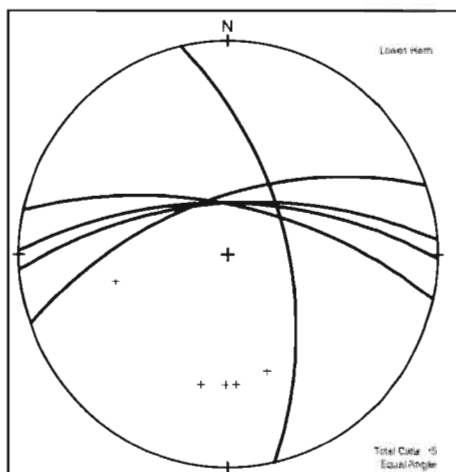
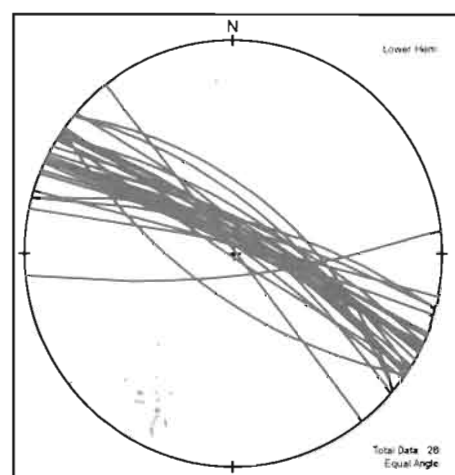
## Schistosité SCH



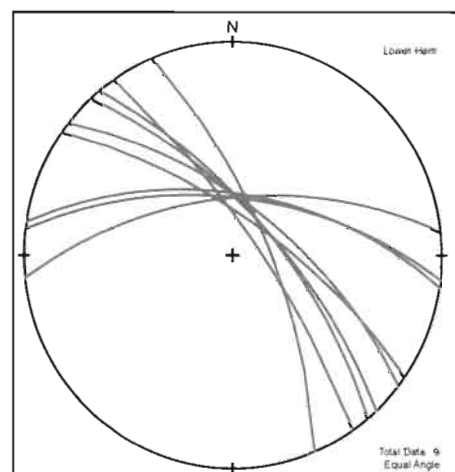
CM06-695



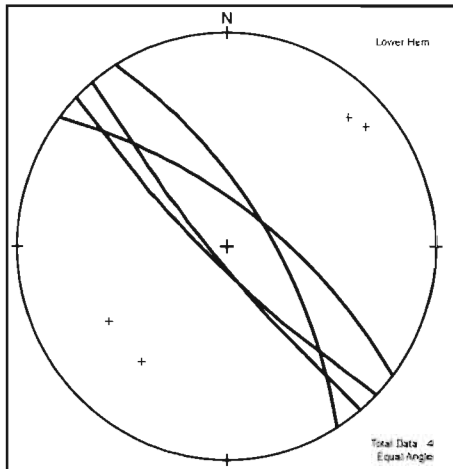
CM06-703



CM06-715

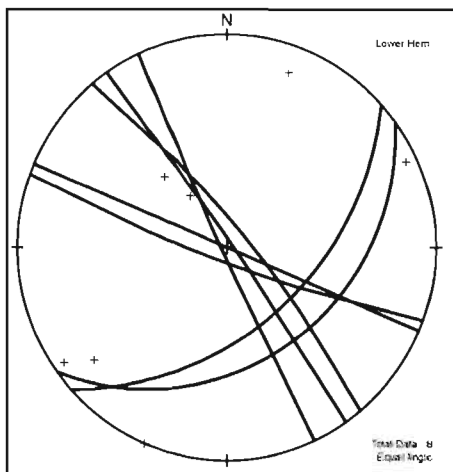
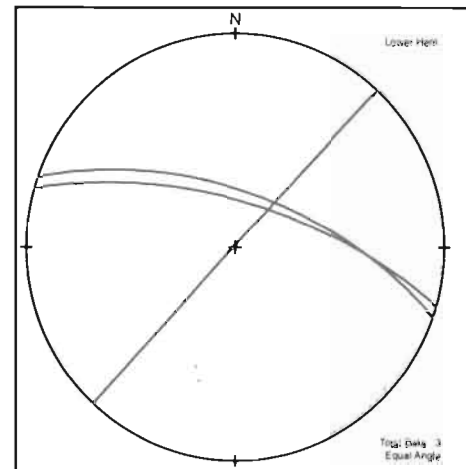


Contact SCH

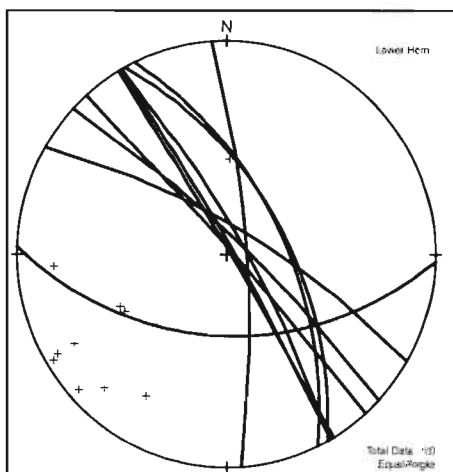
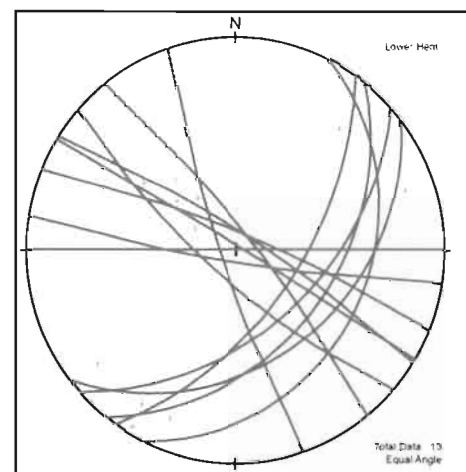


CM06-717

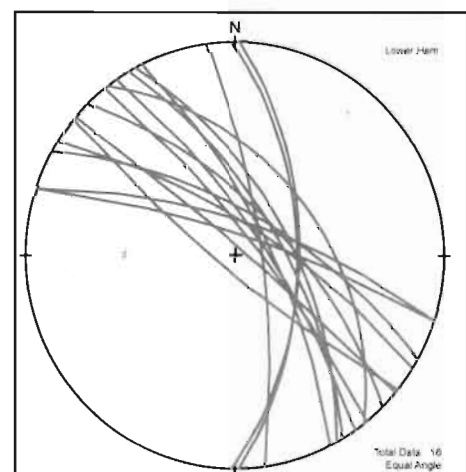
Schistosité SCH



CM06-722

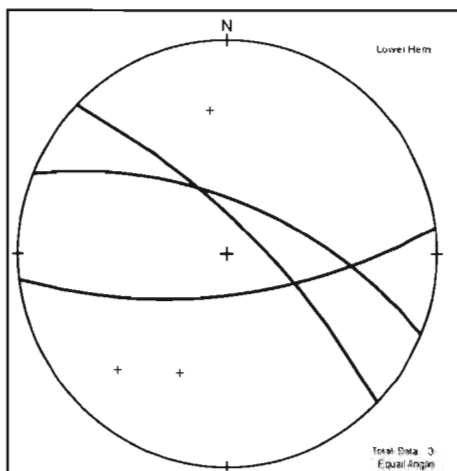


CM06-725

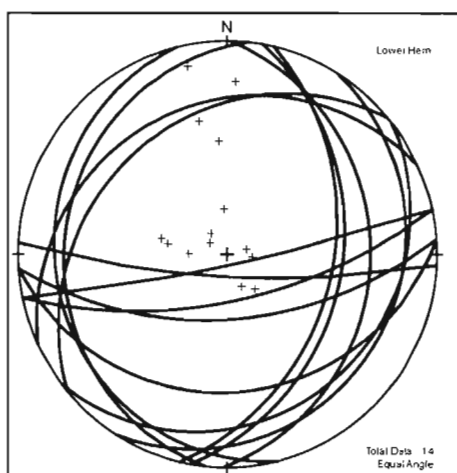
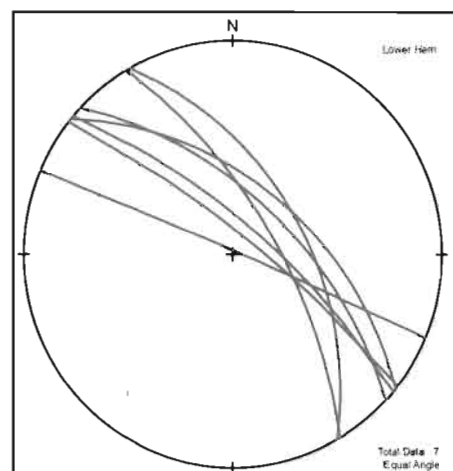


## Contact SCH

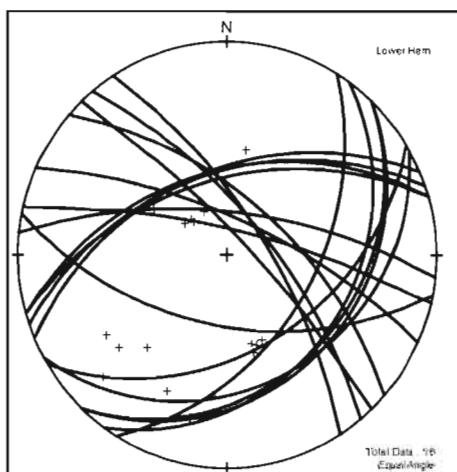
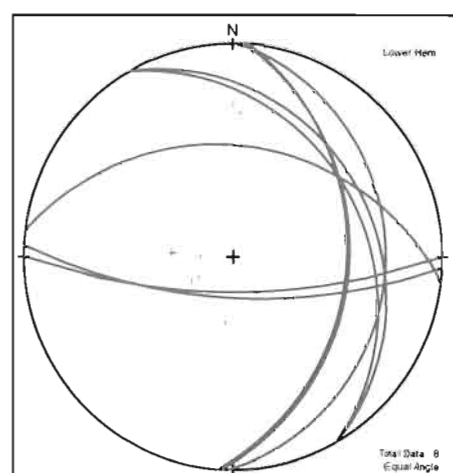
## Schistosité SCH



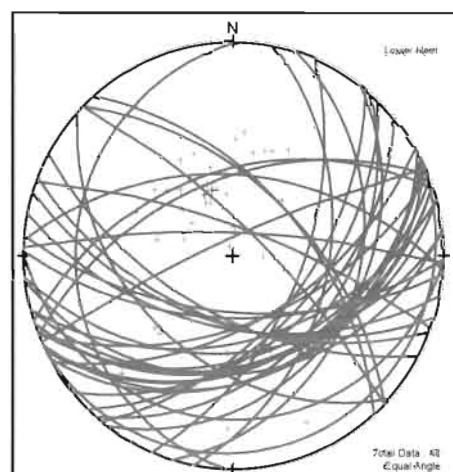
CM06-734



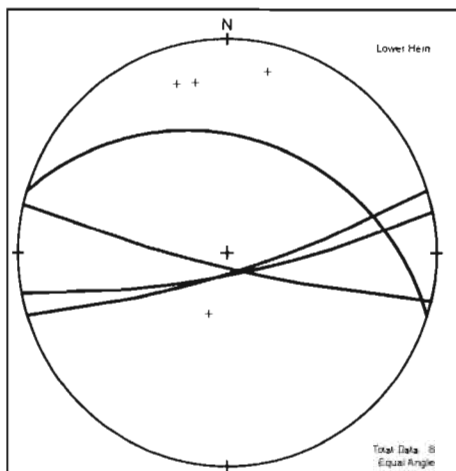
CM06-743



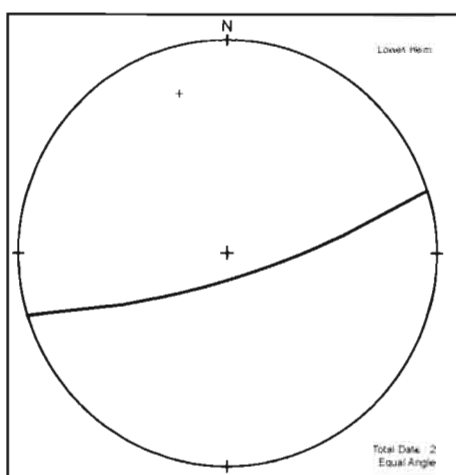
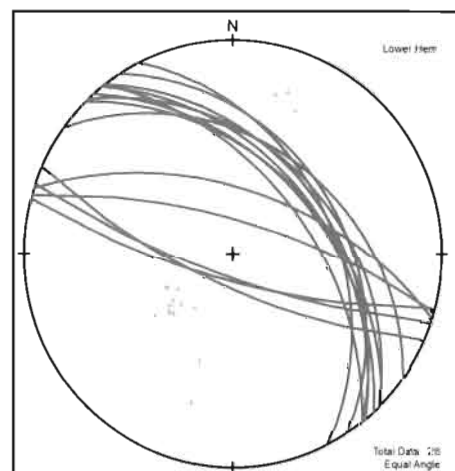
CM06-744



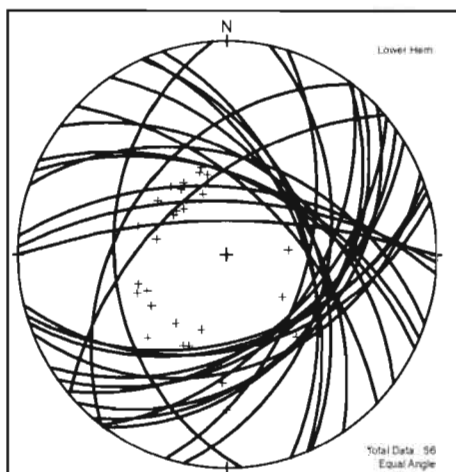
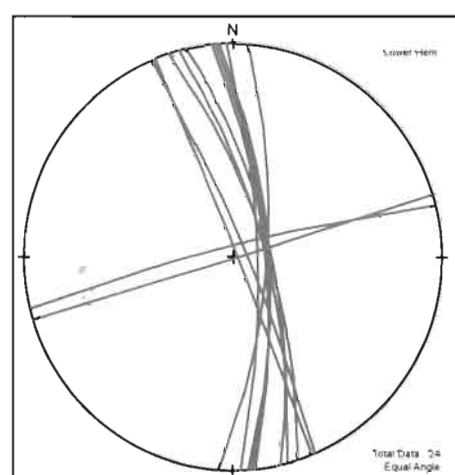
## Contact SCH



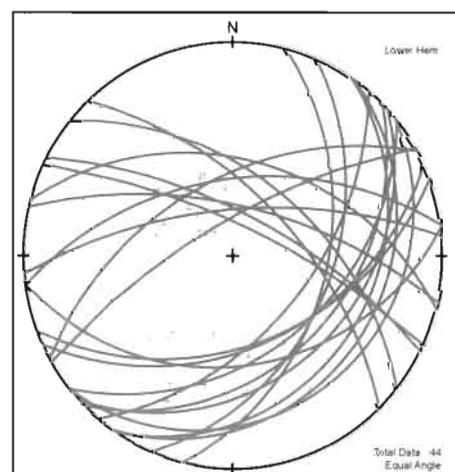
CM06-752



CM06-780

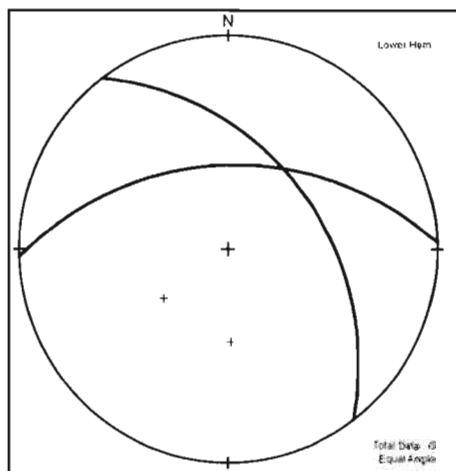


CM06-781

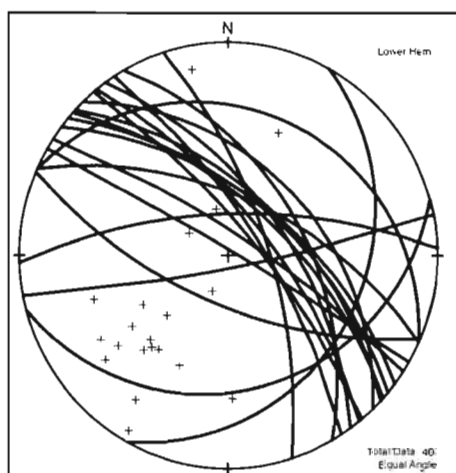
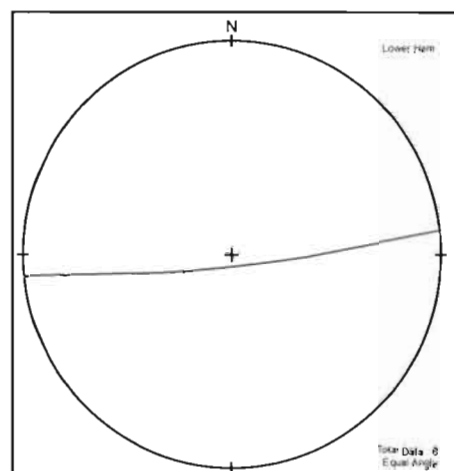


## Contact SCH

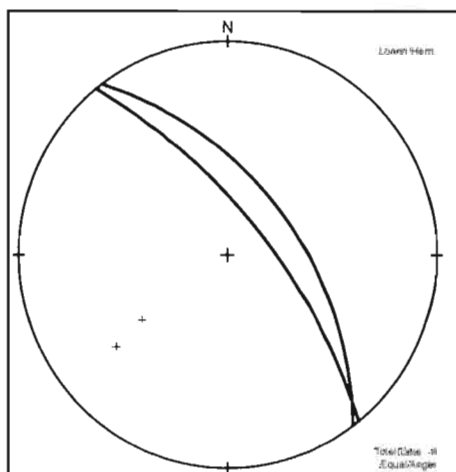
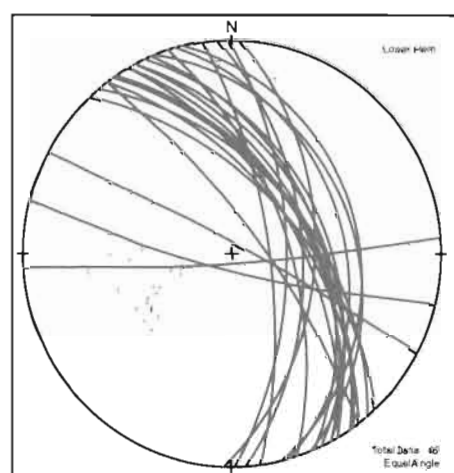
## Schistosité SCH



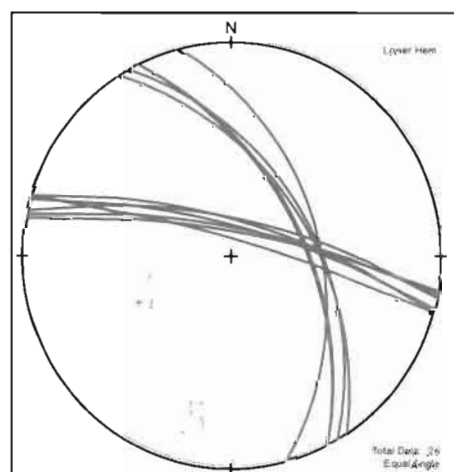
CM06-796



CM06-797

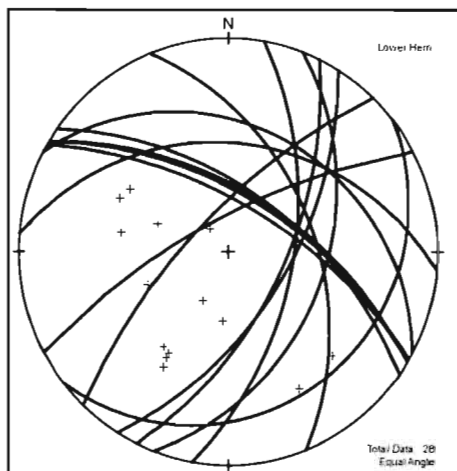


CM06-812

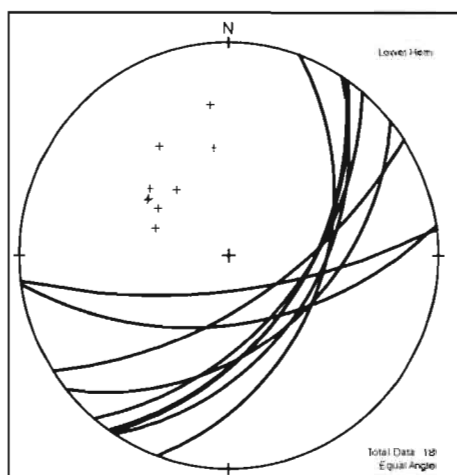
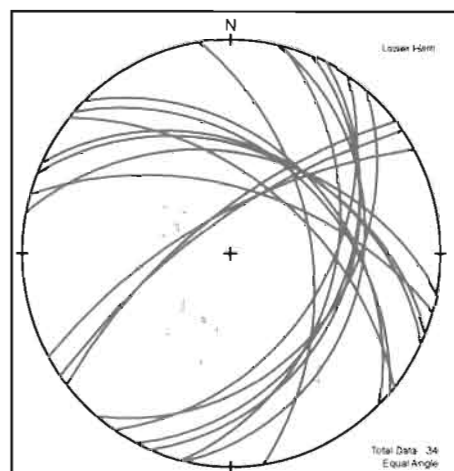


## Contact SCH

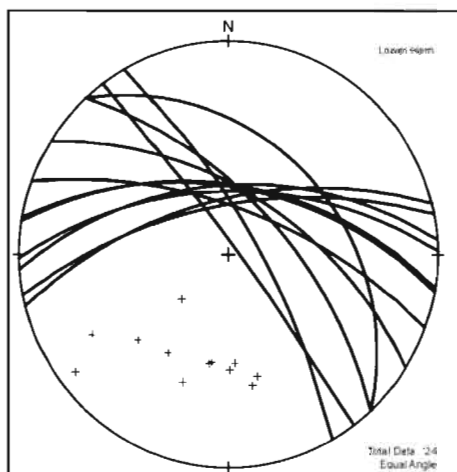
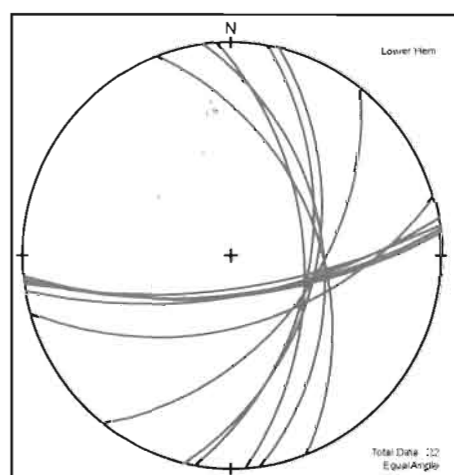
## Schistosité SCH



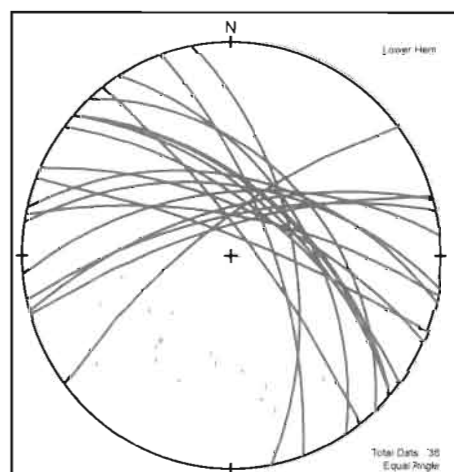
CM06-815



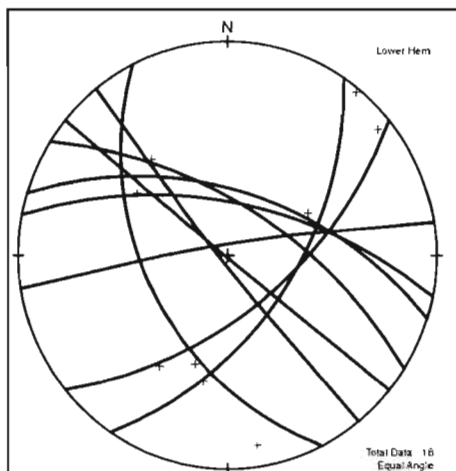
CM06-817



CM06-820

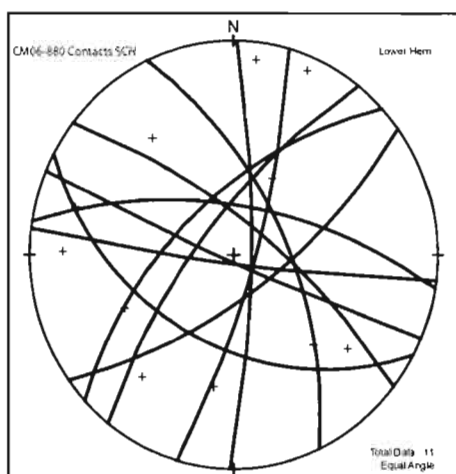
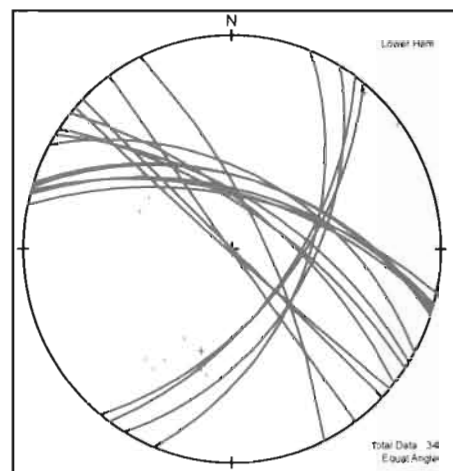


## Contact SCH

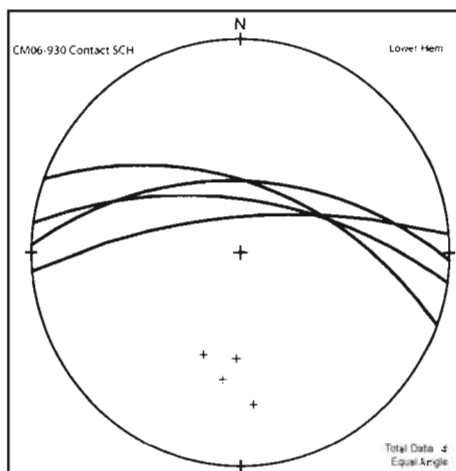
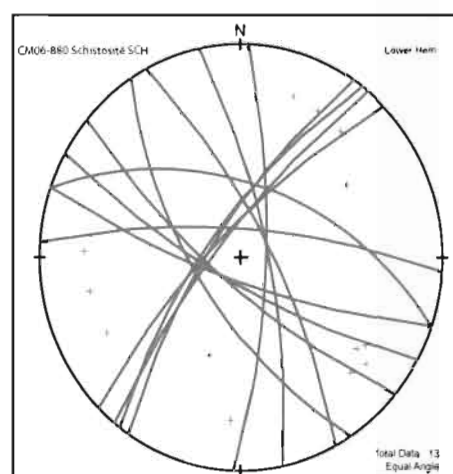


CM06-824

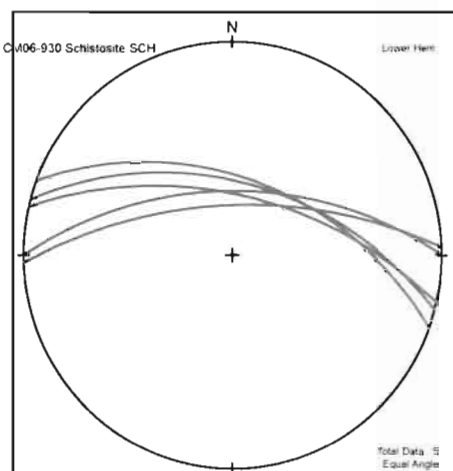
## Schistosité SCH



CM06-880



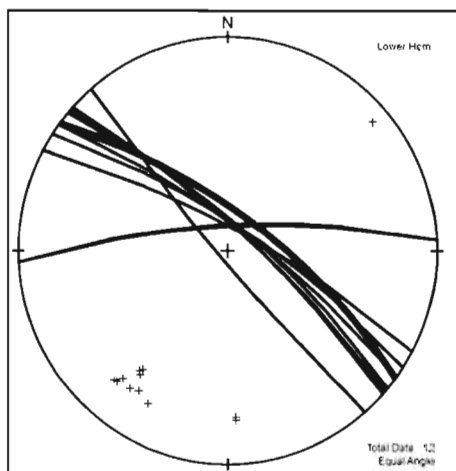
CM06-930



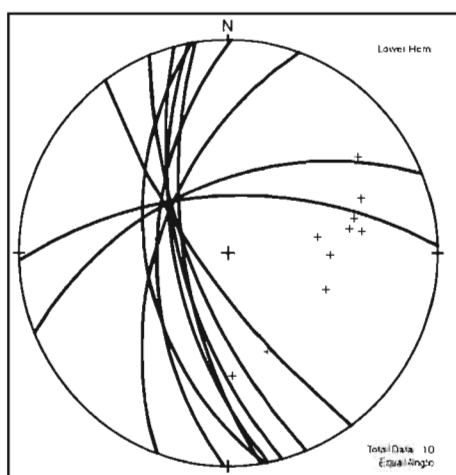
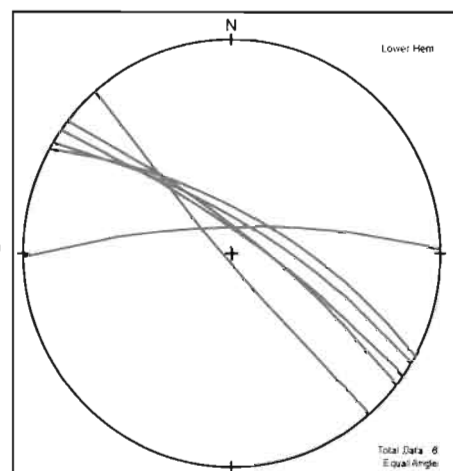


## Contact SCH

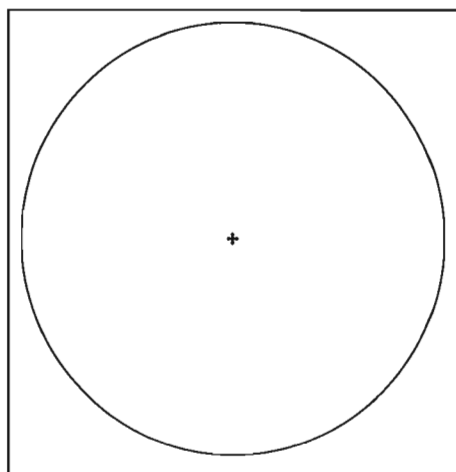
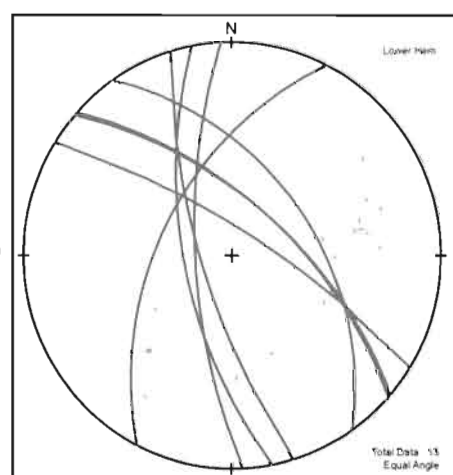
## Schistosité SCH



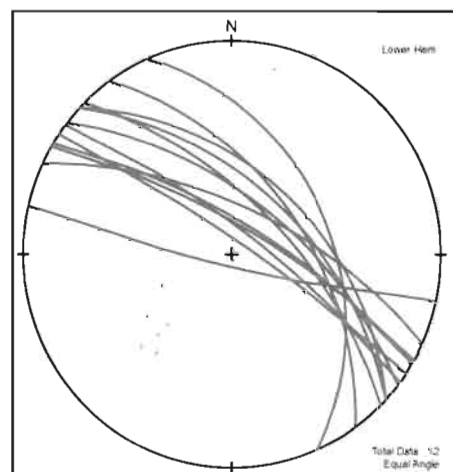
CM07-1019



CM07-1020

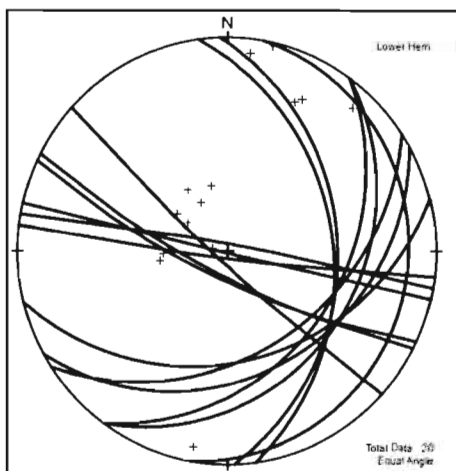


CM06-930

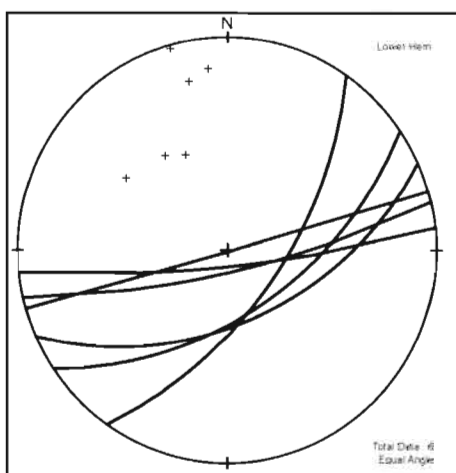
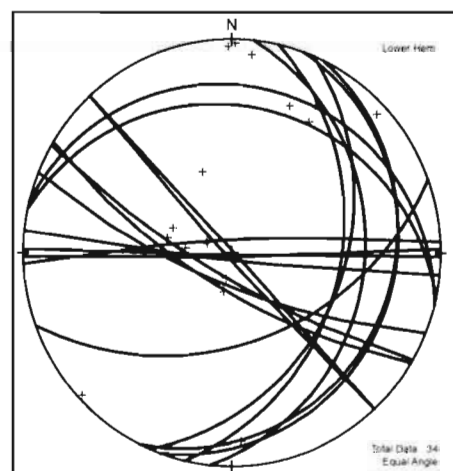


## Contact SCH

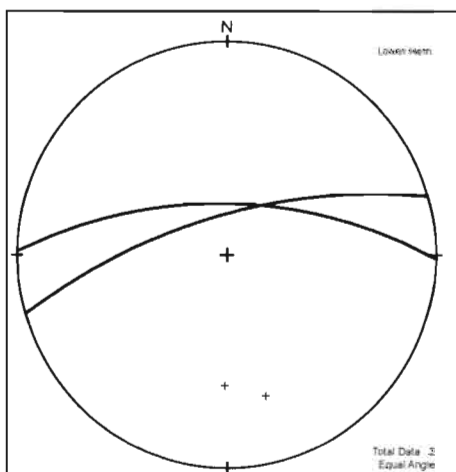
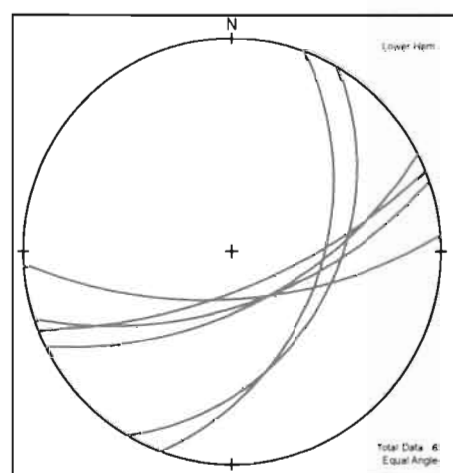
## Schistosité SCH



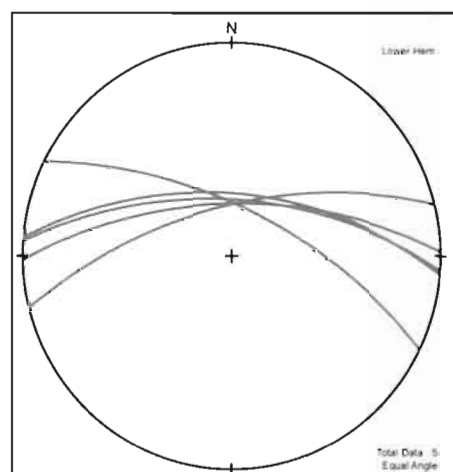
CM07-1277



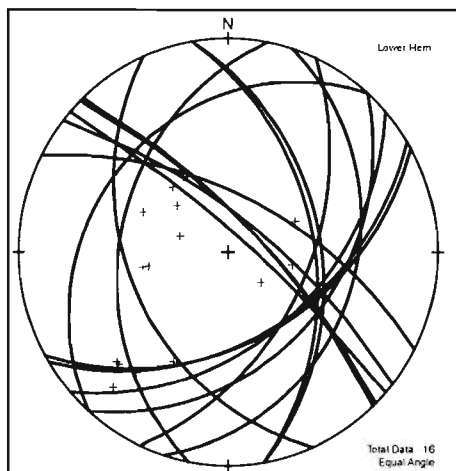
CM07-1297



CM07-1359

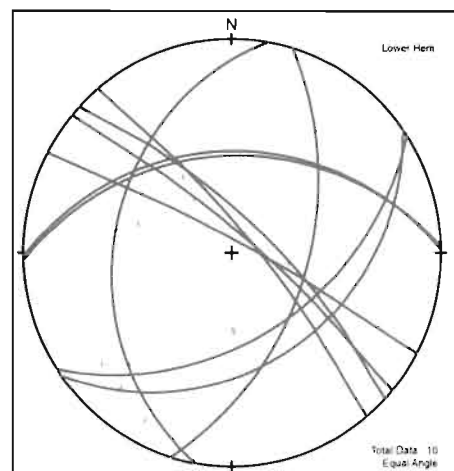


Contact SCH

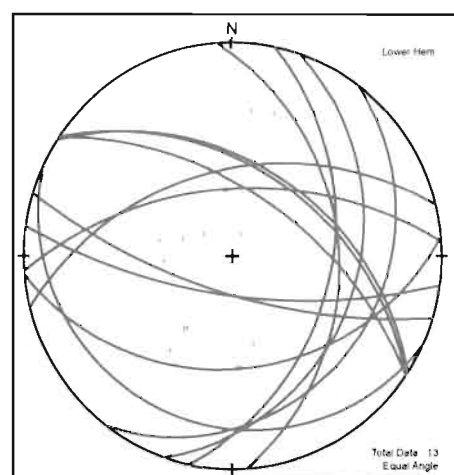
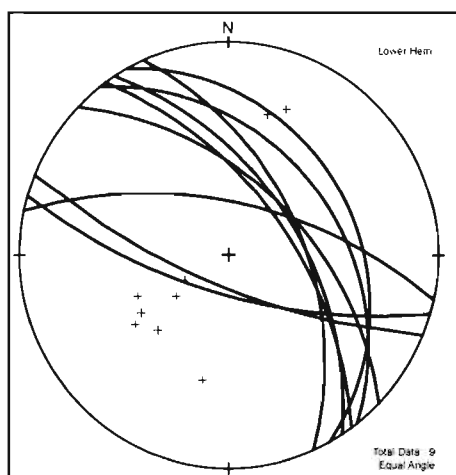


CM07-1362

Schistosité SCH

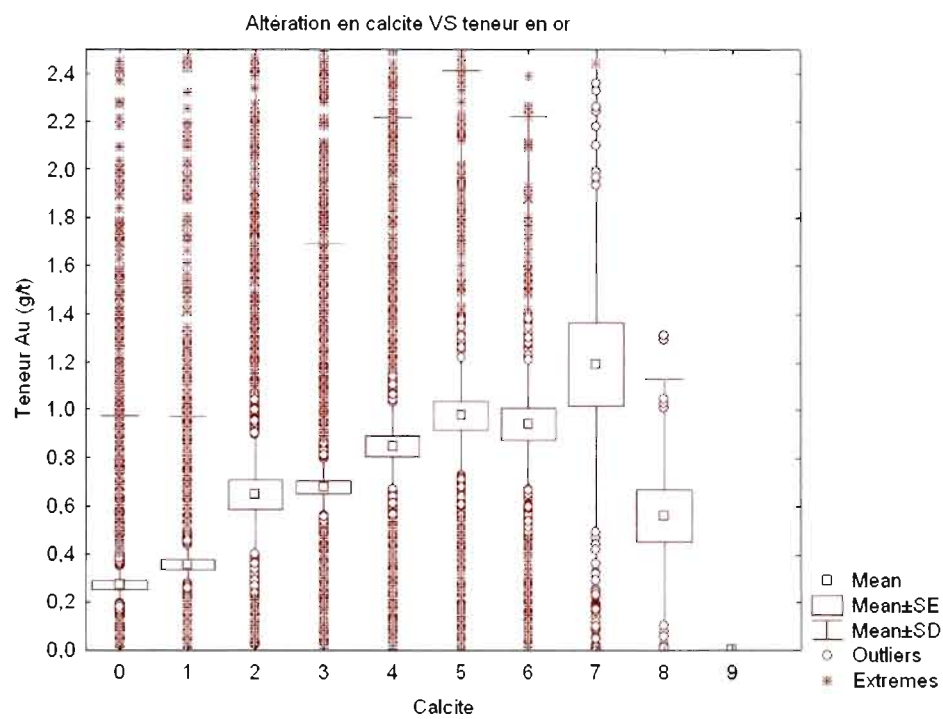
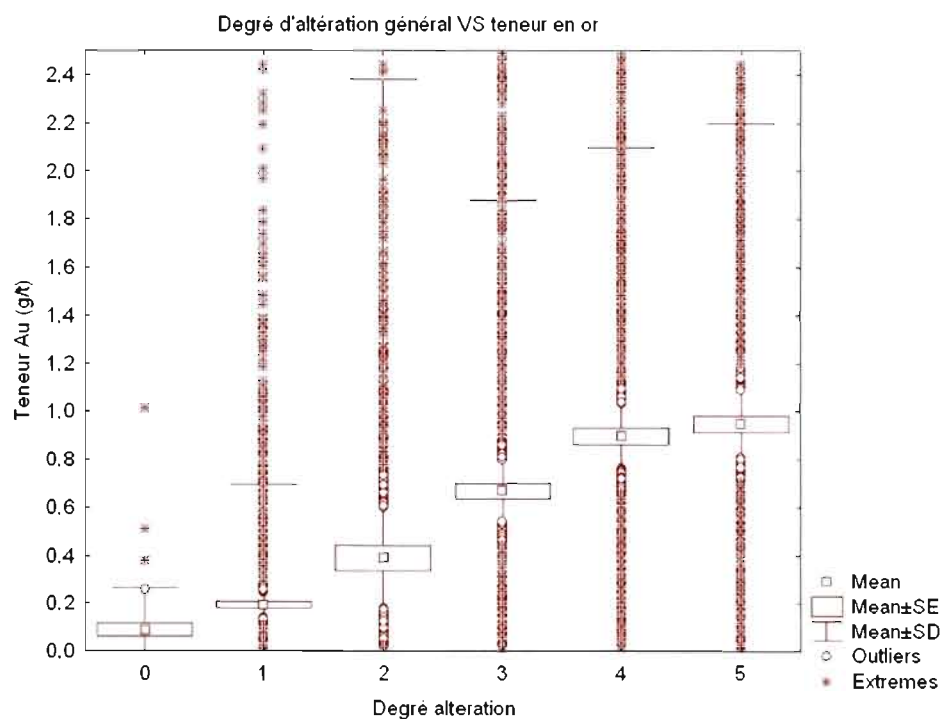


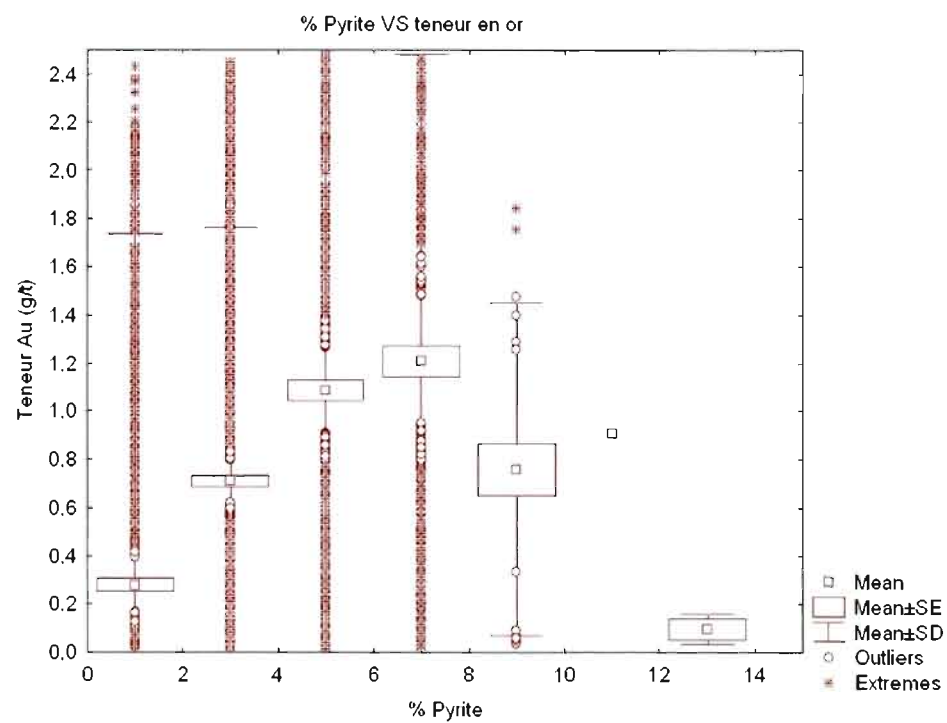
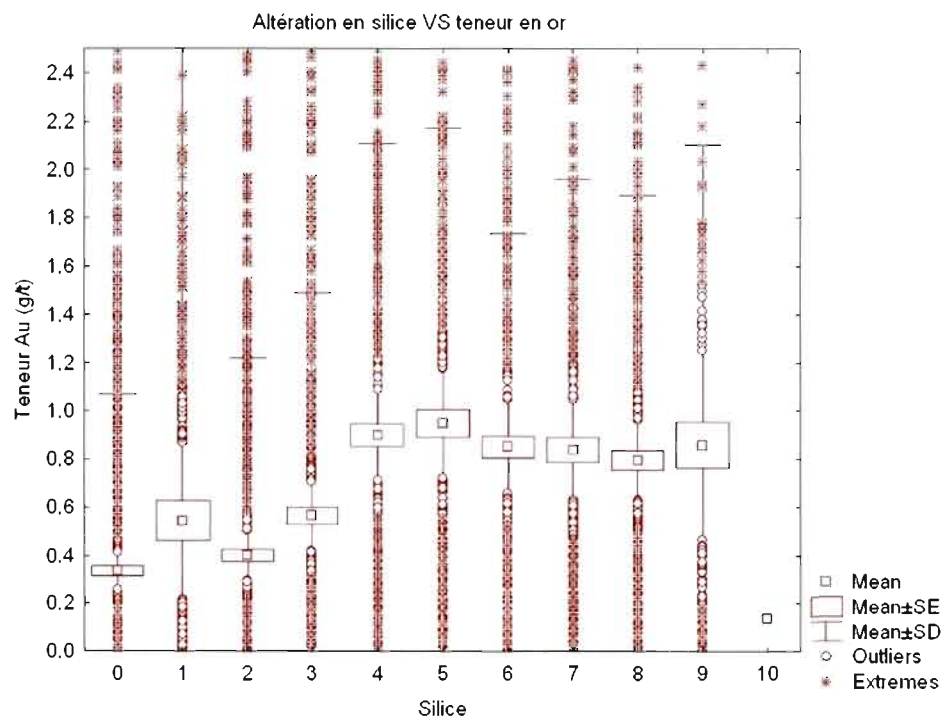
CM07-1417



## APPENDICE C

### COMPILATION STATISTIQUE DES DONNÉES DE FORAGE





## APPENDICE D

### GUIDE D'UTILISATION DE GOCAD – ÉTAPES SIMPLES POUR UN MODÈLE 3D

**GUIDE D'UTILISATION  
DE GOCAD® —  
ÉTAPES SIMPLES POUR  
UN MODÈLE 3D**



**PRÉPARÉ PAR :  
CHRISTIAN BEAULIEU**

**UQÀM**



## 1.0 Introduction

Une des aptitudes fondamentales du géologue doit être la bonne visualisation tridimensionnelle. Les coupes transversales, les cartes géologiques et les blocs diagrammes permettent tous, à des niveaux différents, de se faire une bonne idée d'un terrain géologique donné. Avec l'utilisation grandissante de l'informatique dans toutes les sphères de la science, plusieurs techniques et logiciels ont vu le jour dans le but de simplifier les tâches de scientifiques. Liés à la géologie, on peut penser aux programmes de cartographie et de positionnement géographique (GIS). Depuis plus d'une décennie, des logiciels de modélisation en trois dimensions peuvent désormais être utilisés sur des ordinateurs personnels, permettant ainsi leur utilisation à plus grande échelle. Parmi ces logiciels, certains d'entre eux sont dédiés à une utilisation purement géologique, en incluant des fonctionnalités utiles autant aux géologues du secteur minier et pétrolier, qu'aux géophysiciens ou aux hydrogéologues. La démarche méthodologique qui suit traitera d'un de ces logiciels, soit gOcad (gOcad suite 2.5.2 au moment de la rédaction). Ce guide traitera des différentes étapes menant à l'élaboration d'un modèle 3d géologique simple. Ce guide fourni à un futur utilisateur de gOcad une base pour construire un modèle 3d rapidement à partir de données de forages.

La version de gOcad utilisé par l'UQÀM en est une fournie par Mira Géosciences Ltée, avec le plugiciel Mira Mining Tools (MMT) intégré, permettant de faire des applications simplifiées applicables au domaine minier. Les démarches menant aux modèles tridimensionnels seront expliquées en fonction de ce module d'extension. Les étapes préliminaires pour débiter un projet ainsi que les règles générales à suivre pour produire des bases de données reconnues par MMT seront expliquées dans la prochaine section. S'en suivra des étapes allant de l'importation de base de données jusqu'à la création de surfaces.

## **2.0 Préparation d'un projet**

### **2.1 Construction des bases de données**

Avant de débiter tout projet gOcad, on doit d'abord préparer les fichiers qui nous permettront d'importer les données de forage (collet, déviation, géologie, propriétés). Ces fichiers doivent être en format texte (ASCII) et avoir une mise en page particulière pour qu'ils soient reconnus par MMT. Il est toutefois possible d'utiliser les guides d'importation inclus dans gOcad qui permettent d'importer divers types de fichiers (e.g. : File/Import Objects/Well Data/Paths and Logs : Column-based file). Un format précis pour chaque type de données à importer est requis et sera expliqué dans les sous-sections suivantes; que ce soit pour l'implantation des trous de forage (collet et déviation), les informations sur les unités géologiques ou pour les propriétés associées aux forages (analyses géochimiques, intensité d'altération, porosité, pourcentage de fractures...).

Tout au long de la préparation des bases de données, il est primordial d'être extrêmement rigoureux quant à la mise en page, la syntaxe et l'orthographe de chacun des identifiants de forages. La moindre erreur peut causer beaucoup de trouble lors de l'importation des données et il peut parfois être très long avant de trouver la source du problème. À titre d'exemple, les identifiants de trous de forage doivent être exactement les mêmes d'un fichier à l'autre (voir des exemples d'erreurs dans le tableau 1). La section 2.4 traitera plus spécifiquement des étapes à suivre pour s'assurer d'avoir des fichiers ASCII en santé.

Exemple d'erreurs courantes	Solutions
Identifiants différents d'un fichier à un autre	Uniformiser les identifiants à l'aide la fonction <i>Remplacer</i>
Virgule comme séparateur de décimales	Remplacer "," par "."
Espaces insérés par erreur	Remplacer " " par ""
Valeurs inconnues	Remplacer les valeurs par -99999
Échantillons non analysés	Ajouter -99999 dans la case de propriété
Valeurs plus petites que (<)	Remplacer par la moitié du seuil de détection

Tableau 1 : Erreurs courantes dans les bases de données. La valeur par défaut dans gOcad pour un *no data value* est de -99999. Il est important d'insérer un *no data value* au lieu d'effacer l'échantillon pour que les interpolations faites ultérieurement se fassent correctement.

## 2.2 Collets et déviations

La création de fichiers textes de format ASCII se fait de façon relativement simple. Pour insérer un forage dans gOcad à l'aide de MMT, on doit avoir deux fichiers distincts : (1) Collets et (2) Déviations. Dans le cas du fichier de collets de forages, il s'agit de conserver, dans cet ordre, les colonnes suivantes : (1) Identification du trou; (2) Longitude (X); (3) Latitude (Y); (4) Altitude (Z); et (5) Longueur totale du trou. Le tableau 2a montre un exemple de l'affichage que le fichier devrait avoir. Pour ce qui est du fichier de déviations, on doit conserver les colonnes suivantes : (1) Identification du trou; (2) Distance à partir de la surface le long du trou; (3) Azimuth; et (4) Plongement du trou (tableau 2b).

a _ID	X	Y	Z	LENGTH
CM05-661	713764.6		5334608.5	324 257.42
CM05-665	713610.9		5334670.4	326.7 322.60
CM05-669	713610.6		5334786.4	324.3 310.68
CM05-671	714400.2		5334774	323.2 229.60
CM05-684	713501.7		5334756.5	330.49 322.50
CM05-690	713554.4		5334674.2	329.1 360.00
CM06-695	713442.3		5334724.7	331.4 322.20
CM05-696	713443.7		5334608.3	334.9 270.10

b _ID	DISTANCE	AZIMUTH	DIP
CM05-661	0 0	-88	
CM05-661	125.00 0	-88	
CM05-661	230.00 0	-88	
CM05-661	374.40 0	-87	
CM05-665	0.00 0	-90	
CM05-665	127.60 0	-90	
CM05-665	313.00 0	-90	
CM05-669	0.00 0	-90	
CM05-669	142.70 0	-89	
CM05-669	154.70 0	-89	
CM05-669	280.00 0	-87	
...	...	...	...

Tableau 2 : Représentation de fichiers ASCII à importer dans gOcad :  
 (a) Données sur les collets; (b) Données sur les déviations. À noter  
 que la langue anglaise est utilisée pour le texte des fichiers dans le but  
 d'éviter un maximum d'erreurs.

## 2.3 Géologie et propriétés

Une campagne de forage est généralement suivie de descriptions lithologiques (géologie) et d'analyses chimiques (or, argent, cuivre, molybdène, plomb, zinc...) qui peuvent ensuite être insérées dans gOcad et rattachées aux forages. Le tableau 3 illustre les modèles à suivre pour les fichiers en format texte.

a	Hole_ID	FROM	TO	Geologie
	CM05-661	2.8	30.5	GR
	CM05-661	30.5	75.8	PO
	CM05-661	75.8	124.0	GR
	CM05-661	124.0	131.8	BR
	CM05-661	131.8	325	PO
	CM05-665	9.1	118.9	GR
	CM05-665	118.9	124.6	BR
	CM05-665	118.9	347.4	PO
b	Hole_ID	FROM	TO	Au
	CM05-661	2.8	4.6	0.143
	CM05-661	4.6	6.1	0.071
	CM05-661	6.1	7.6	0.197
	CM05-661	7.6	9.1	0.901
	CM05-661	9.1	10.6	0.204
	CM05-661	10.6	12.1	1.155
	CM05-661	12.1	13.6	2.18

Tableau 3 : Représentation de fichiers ASCII à importer dans gOcad : (a) Géologie; (b) Propriétés. Dans gOcad, la propriété prendra le nom donné à la colonne correspondante (Au dans ce cas-ci).

## 2.4 Conseils pratiques sur les fichiers d'importation

Tel que stipulé à la section 2.1, la rigueur est très importante dans les fichiers d'importation, afin que les étapes subséquentes se fassent de façon relativement simple et rapide. Une bonne méthode d'exécution est de préparer tous les fichiers ASCII à l'aide d'un tableur (e.g. Microsoft Excel) et ensuite de les sauvegarder en format texte avec tabulation (extension *.txt*). De cette façon, la révision et la correction des données sont plus conviviales et le risque d'erreur est moindre. Les conseils qui suivent sont dans l'unique but d'accélérer le processus d'importation de données pour sauter le plus rapidement à la modélisation 3d, conseils s'appliquant principalement aux projets contenant plusieurs dizaines de forages. Énormément de temps peut être perdu à chercher une à une les erreurs suite à l'importation de plus de

mille forages, d'autant plus qu'il peut se passer beaucoup de temps avant de se rendre compte de ladite erreur.

Pour les fichiers concernant la position du collet et celui de la déviation, la vérification la plus importante est de s'assurer de la bonne correspondance entre les trous. Les noms donnés aux trous de forage sont souvent complexes pour permettre un meilleur triage. Si on prend un des exemples de trous énumérés ci-dessus, CM05-665, on pourrait avoir divers type d'erreur issus du log de forage lui-même, tels que : CM06-665, CM 05-665, CM05 665, CN05-665, CM-05665, CM05-655... Ces erreurs empêchent évidemment une importation sans problème. Pour ces deux fichiers, les autres erreurs potentiellement rencontrées sont facilement corrigeables suite au tri successif des diverses colonnes et en identifiant les incongruités.

Le cas des fichiers contenant les données sur la géologie et sur les propriétés est légèrement plus complexe puisqu'il y a forcément plusieurs étapes de « purification » des données. La classification géologique utilisée par les géologues en charge de la description des forages ne convient pas nécessairement au modèle 3d qui sera effectué. Une ou plusieurs unités peuvent être omises si elles sont jugées peu ou pas importantes. Une alternative à l'élimination systématique d'une unité géologique donnée serait de faire des fichiers distincts pour chaque unité et d'importer seulement les unités désirées. De cette façon, l'utilisateur peut importer ultérieurement un contact géologique qui lui semblait inutile. Encore une fois, il est important d'uniformiser le nom des contacts géologiques pour être constant d'un forage à un autre (majuscules vs. minuscules). Le fichier de propriétés peut être plus long à rendre conforme dû aux divers codes utilisés suite aux analyses. Par exemple, tous les échantillons possédant une analyse sous le seuil de détection doivent être remplacés par la moitié de ce seuil (e.g. :  $>0.05 \rightarrow 0.025$ ). Certains échantillons n'ont pas été analysés, et dans ces cas précis on ne doit absolument pas insérer une case vide mais bien stipuler à gOcad qu'aucune valeur n'est disponible pour cet endroit (-

99999 est la valeur par défaut pour un *no data value*, qui peut être modifié par l'utilisateur lors de l'importation; voir section 3.2). En faisant un tri en ordre croissant des valeurs de propriétés, il devient facile de repérer des valeurs erronées (une valeur beaucoup trop élevée, trop faible, possédant plus d'un séparateur de décimales...).

Dépendamment de la puissance de l'ordinateur sur lequel fonctionne gOcad, il est suggéré de ne pas importer une trop grande quantité de forages simultanément. Dans la plupart des cas, l'importation de trois à quatre cent forages simultanément ne devrait pas causer de trouble. Une machine qui n'est pas à la hauteur peut toutefois causer certains maux de tête à l'utilisateur, tant au niveau des temps de processus ou d'importation, de la modification de données ou encore simplement pour l'affichage d'un groupe volumineux de forages.

Les erreurs ou omissions mentionnées sont celles rencontrées ou supposées par le rédacteur du manuel; il se peut donc que d'autres types d'erreur existent.

### 3.0 Importation des données

#### 3.1 Nouveau projet et notions de base

Suite au démarrage de gOcad, on a le choix de créer un nouveau projet (*New Project*) ou de charger un projet déjà existant (fig.1). Lors de la première utilisation du logiciel pour un nouveau projet, on doit choisir un emplacement pour sauvegarder le projet dans un nouveau dossier et lui attribuer un nom. Par la suite, il faut choisir les modules que gOcad va démarrer à chaque fois que le projet sera lancé, tel que montré sur la figure 2. Ce choix est important dans la mesure où des fonctionnalités inutiles peuvent ralentir les applications d'un projet volumineux ou dans le cas où l'ordinateur possède des ressources limitées. Il est cependant possible de choisir les modules à ouvrir à chaque démarrage du projet en cliquant sur *Change modules before opening project* (flèche rouge sur figure 1) avant d'ouvrir un projet existant.

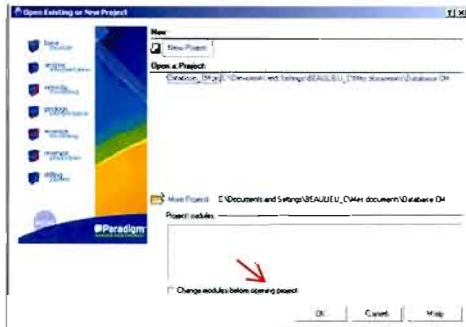


Figure 1 : Fenêtre d'ouverture ou de création de projet.

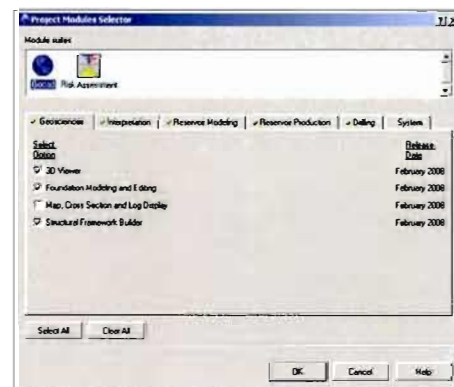


Figure 2 : Fenêtre de sélection de modules que gOcad chargera à chaque ouverture du projet.



Une fois le projet démarré, certaines options propres aux préférences de l'utilisateur restent à être définies (figure 3). Normalement, les options par défaut sont celles préférées, sauf dans le cas de la direction des logs de forage (*Depth axis positive values*) où il est préférable d'utiliser l'option *upward*, de façon à ce que ce soit conforme aux diagraphies (la fonction *downward* signifie que les valeurs de l'axe des Z augmentent vers le bas). Tout est maintenant mis en place pour débiter le projet.

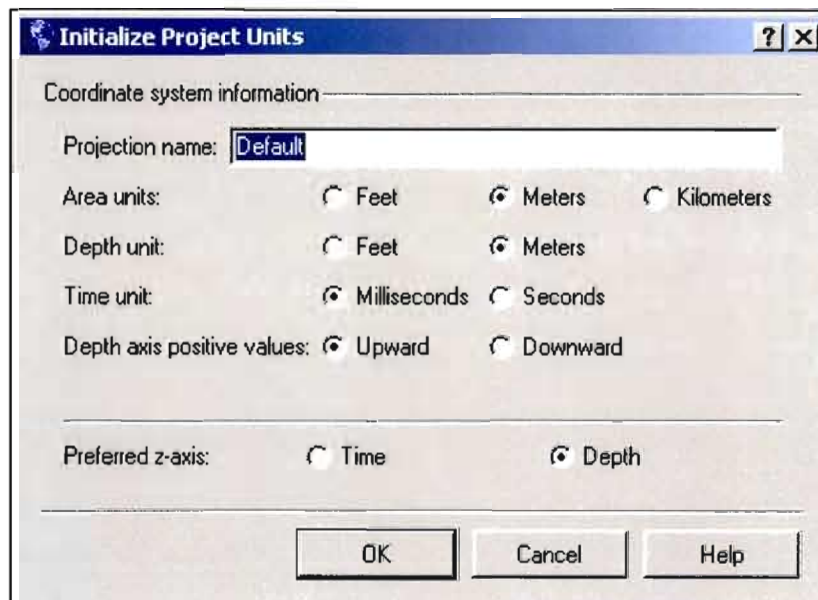








Figure 3 : Unités de base à sélectionner lors de la création d'un nouveau projet. Ces unités ne peuvent pas être modifiées par la suite, donc une erreur dans la sélection de celle-ci nécessite de créer un nouveau projet.




Quelques notions de base pour faciliter l'apprentissage de gOcad sont de mises. Toutefois, c'est avec l'expérience que l'utilisateur trouvera la façon dont il préfère utiliser le logiciel, puisqu'il y a souvent plus d'un chemin possible pour une application donnée. Le contrôle de la souris est essentiellement la seule « complication » de l'utilisation de gOcad : (1) clic droit pour faire bouger les objets autour d'un point donné (la touche F9, ou , sert à déterminer ce point d'ancrage);

(2) le clic gauche sert de zoom avant/arrière (combiné à un mouvement arrière/avant de la souris); et (3) le clic du milieu sert à bouger les objets latéralement. L'idéal est d'ouvrir un projet existant et de se familiariser avec le mouvement des objets et les différentes options de visualisation (outil de distance , zoom précis , *slicer* , options de vue ). L'utilisateur est aussi invité à modifier le projet à l'aide des diverses options qui peuvent affecter les trois types d'objets principaux : *Pointsets* (points), *Curves* (courbes) et *Surfaces* (surfaces).

### 3.2 Importation des trous de forage

L'utilisation du plugiciel fourni par Mira Géosciences Ltée facilite l'importation d'un grand nombre de trous de forage, en suivant le chemin suivant: File/Import Objects/Mining Importers/Drillholes... La fenêtre illustrée par la figure 4 apparaît et elle nous permettra d'importer, d'un seul coup, la trace du (des) forage(s), de sa géologie et de ses propriétés. Si l'utilisateur doute de la qualité des données de collets et de déviations, il est préférable d'importer les forages, la géologie et les propriétés en deux ou trois étapes (forages, géologie+propriétés ou forages, géologie, propriétés). Sous la rubrique *Geology File*, les trois options visuelles de la géologie sont fortement conseillées d'être appliquée. Les marqueurs (*Markers*) nous indiquent un contact entre deux unités, tandis que l'option *As tops* précise que le marqueur indiquera l'unité sous-jacente. La création de zones (*zones* ) peut être fortement utile pour la modélisation de surfaces de contact géologique (sujet traité à la section suivante). Si on importe une grande quantité de forages et qu'on ne sait pas lesquels ont des analyses chimiques ou encore des données sur leur géologie, il est possible d'omettre leur importation en cliquant sur *Wells must contain geology* et/ou *Wells*

*must contain properties*, dépendamment du cas échant. Finalement, il peut être très utile de cocher *Show statistics before import* pour avoir un aperçu de ce qui sera importé dans gOcad et par le fait même de noter des erreurs potentielles (e.g. : la fenêtre nous indiquera le nombre de trous importés à partir du fichier de collets et le nombre de trous possédant des données de déviation; ces deux chiffres doivent forcément être les mêmes). Dans toute application gOcad, on a la possibilité de cliquer sur *OK* ou sur *Apply*. Ces deux options sont identiques, à la différence qu'en cliquant sur *OK*, la fenêtre se ferme. Il est donc très utile d'utiliser *Apply* si on veut répéter la même application, avec des fichiers ou données différentes. Suite à l'importation du forage fictif CM05-665 (Fig.5), on aperçoit la géologie rattachée au forage (zones rouges et vert clair) et les propriétés qui y sont rattachées (l'intensité de la minéralisation en or est représentée par la fine ligne blanche).

La visualisation des forages peut être modifiée selon divers paramètres dans l'onglet *Attributes* (encadré rouge de la fig.5; ). Plusieurs options s'offrent à nous pour choisir quels forages vont subir les modifications visuelles : soit d'une sélection automatique de tous les objets, une sélection à l'aide de contrôle clic sur les objets voulus dans le menu déroulant, ou une sélection de tous les objets présents dans le *viewer*<sup>1</sup>. Cette dernière option est souvent la plus utile puisque qu'il est plus facile de sélectionner les objets sous l'onglet *Objects* et ensuite, un seul clic sur *Select Shown* () suffit. Sous l'onglet *Attributes*, on peut modifier la couleur de la trace du forage, faire apparaître les marqueurs, le nom des forages, un indicateur du point d'encrage et faire apparaître et modifier la couleur des zones géologiques (*zones* ). Pour une raison inconnue, la modification d'une zone géologique pour plusieurs dizaines de forages peut prendre plusieurs minutes avant de s'accomplir.

---

<sup>1</sup> Le *viewer* est la section où sont représentés les objets tridimensionnels (section à fond noir de la figure 5).

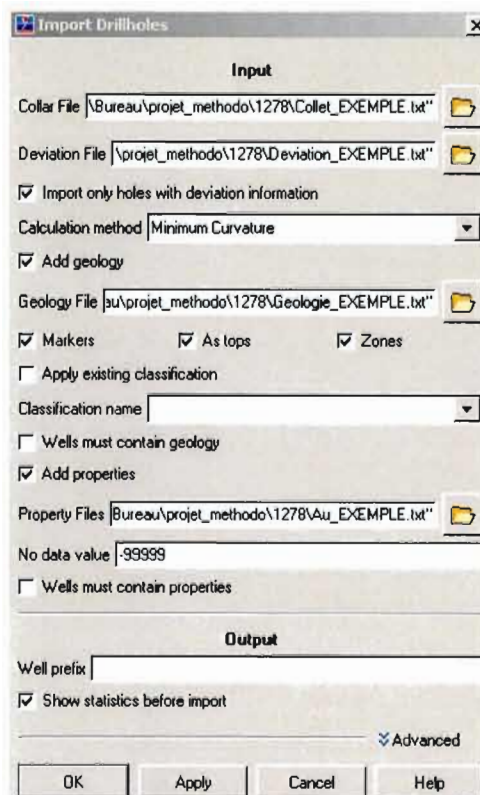


Figure 4 : Fenêtre d'importation de forages, de leur géologie et leurs propriétés.

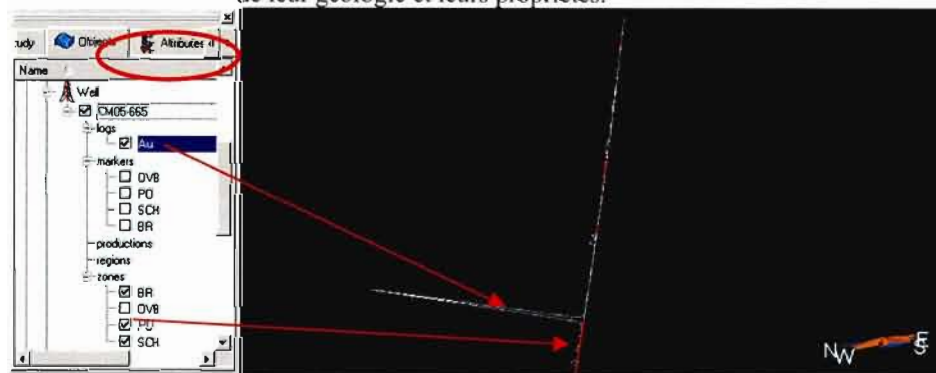








Figure 5 : Visualisation 3d d'un forage avec la géologie (zones; sections colorées) et les teneurs en or (logs; ligne blanche).

### 3.3 Uniformisation des forages et conseils pratiques

Dans le but de rendre l'expérience avec gOcad plus conviviale, il peut être préférable, dans le cas où on travaille avec plusieurs centaines de forages, de regrouper les forages (*Wells* ) dans des groupes (*Groups* ) qui gèrent les mêmes attributs (*Attributes* ). Un clic-droit sur  permet de créer un nouveau groupe et d'y glisser les forages voulus (il faut faire attention de bien choisir *Wells* pour le type d'objet que le groupe va contenir). La classification des groupes de forage peut se faire selon diverses méthodes, en rapport avec ce que nous avons sous la main : par sections longitudinales, par année de forage, par type de forage (géotechnique vs. exploration) ou par type de données disponibles. Une fois les groupes créés, on peut leur attribuer des paramètres précis, tels que des couleurs de traces de forage différentes pour mieux les différencier. Par contre, si on désire conserver les attributs définis avant la création de groupes, il faut le spécifier lors de l'ajout des forages concernés dans le groupe (décocher la case *Clear object attributes before adding*).

Avant de commencer la modélisation 3d ou tout simplement la visualisation de forages dans l'espace, le lecteur est fortement recommandé de « jouer » avec gOcad, soit d'explorer les menus, créer des courbes (*Curves* ) et des surfaces (*Surfaces* ) et de modifier ces objets à l'aide des outils disponibles. La création et la modification d'objets se fait toujours plus facilement en conservant le même point de vue de façon à rendre soit X, Y ou Z invariable. Lors de la création de courbes dans l'espace, gOcad ne connaît pas la valeur de la troisième dimension qui est « cachée » (voir fig.6 pour illustration du problème); l'utilisateur est donc conseillé d'uniformiser cette troisième dimension aussitôt la courbe créée. L'utilisation des *slicers* peut faciliter cette tâche puisque les points (éléments définissant une courbe) seront confinés à l'espace restreint par ce *slicer*. Une fois habile à manipuler ET

modifier ces objets dans l'espace, la modélisation à l'aide de données géologiques peut débuter.

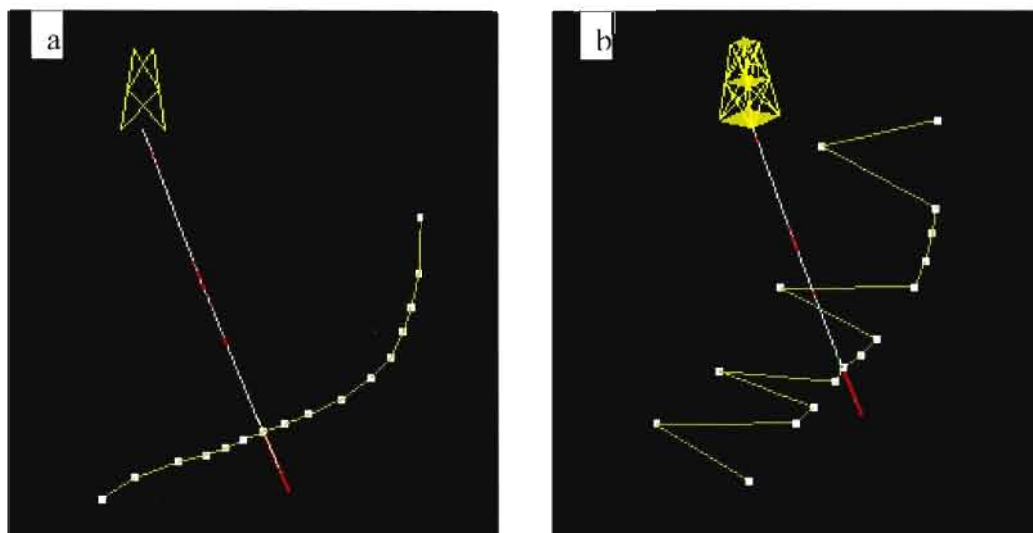







Figure 6 : (a) Vue vers l'ouest d'un contact dessiné manuellement; (b) même contact en perspective, vue vers le nord-ouest. On remarque que certains points peuvent être décalés sans que cela ne paraisse dans le plan initial.





## 4.0 Création d'objets géologiques

### 4.1 Création du squelette

Maintenant que tous les forages ont été insérés au projet, plusieurs opérations s'offrent à nous. Dans ce guide, une emphase sera mise sur la modélisation des contacts géologiques. Plus d'une technique existent pour modéliser des contacts, mais une seule sera l'objet de ce guide, soit celle nécessitant un minimum d'information. Effectivement, des données géophysiques peuvent servir de base pour la modélisation de contacts, malgré qu'il soit préférable, voire plus rigoureux, d'utiliser les diverses méthodes géophysiques pour confirmer notre modèle préalablement issu d'observations géologiques. La méthode proposée dans ce guide est relativement simple et consiste à faire un balayage des forages selon x, y et z avec le *slicer* () et de produire subséquemment des courbes (*Curves* ) à l'aide de l'outil *New Open Curve* ou *Digitized Open Curve* (). Cette technique requiert un nombre de forage minimum capable de recouvrir adéquatement la région à modéliser, forages sur lesquels la géologie doit y être rattachée.

La première étape est d'ouvrir le *slicer* et de l'initialiser (« reset » ) une fois les forages bien en vue dans le *viewer*. Une boîte sera alors redimensionnée autour des objets représentés par gOcad. À l'aide de l'éditeur de *slicer* () il faut redimensionner cette boîte en réduisant jusqu'à quelques mètres une des trois variables spatiales (X, Y ou Z). La densité des forages dictera l'épaisseur du nouveau *slicer*, de façon à avoir des sections comportant suffisamment de forages. La technique consiste à balayer la région forée avec le *slicer* (en glissant la souris tout en maintenant le bouton central enfoncé) de façon à dessiner, progressivement, des contacts géologiques en se servant des *zones* de forages. Les contacts géologiques devront passer le plus possible par les contacts de ces *zones*, puisque le début et la fin d'une *zone* correspondent à des données exactes, soit représentant un taux de

certitude maximal. Les points qui seront créés entre les forages seront donc de l'interpolation, d'où l'importance d'une bonne densité de forage pour diminuer les incertitudes. Chaque série de courbes correspondra à une section (ou à un plan niveau si le balayage se fait selon l'axe des Z) de la région à modéliser. Pour créer ces courbes (*Curves*), il est suggéré d'y aller à main levée avec l'outil *New Open Curve* (disponible avec un clic-droit sur *Curves* dans le menu d'objets) ou par *Digitized Open Curve* () . La création de ces courbes se fait assez aisément si l'angle de vue est exactement parallèle à l'axe invariable (par exemple, si le balayage se fait exactement selon l'axe des X, l'angle de vue doit être soit vers l'est ou soit vers l'ouest). Le dernier point de la courbe à être dessiné doit être fait avec un clic-droit de la souris, de façon à ce que gOcad sache qu'il s'agisse de la fin de la courbe. Une fenêtre apparaît alors et nous devons choisir un nom pour cette section, pour lequel il est conseillé d'inclure le positionnement de la section et le nom du contact géologique (e.g. : E4450\_Sediments; E4450\_Intrusif; E4480\_Sediments; E4480\_Intrusif...). Lorsqu'une courbe est créée, l'utilisateur peut la modifier s'il juge qu'elle n'est pas adéquate, soit en utilisant un outil manuel () , pour lequel il est primordial d'avoir le bon angle de vue sans quoi le point bougera dans la troisième dimension, ou soit par les diverses outils tels que *Move To*, *Translate* ou *Drag with Mouse* (disponible sous *Curves*→*Tools/Local...Nodes...*). Seule l'expérience avec gOcad permettra au modélisateur de bien choisir la méthode la plus appropriée pour chaque modification. Par contre, lorsqu'une section est terminée pour un contact donné<sup>2</sup>, il est préférable d'uniformiser les valeurs qui sont supposées être invariables (axe des X dans l'exemple ci-dessus), puisque la courbe dessinée aura des points

---

<sup>2</sup> Conseil : Il peut être préférable, quoique plus long, de modéliser un seul contact à la fois pour bien garder en tête la géométrie des sections précédentes. Dessiner plusieurs contacts en même temps peut induire quelques erreurs d'interprétation. Par exemple, si en un point donné sur une section le contact est clairement plissé, il ne sera pas forcément évident que ce même contact sera plissé sur une section adjacente, quelques mètres plus loin, si le plissement se produit entre deux forages.



répartis sur l'axe des X (le *slicer* possède une profondeur qui n'est pas nulle et certains points se retrouveront collés au forage; voir fig.6). Idéalement, on aligne la courbe au centre du *slicer* ou selon la concentration des forages avec la fonction Compute/Apply Script/On Object... On choisit l'objet à modifier et on le modifie en inscrivant un script dans la fenêtre *Main script* (e.g. : X=714550;). Pour obtenir des surfaces plus lisses et plus belles, il est conseillé d'augmenter la densité de points sur la courbe (Curve→Tools/Densify...le choix du maximum de distance entre deux points est à la discrétion du lecteur).

Une fois le balayage complété selon un axe, un deuxième balayage selon un autre axe peut s'avérer très révélateur sur certaines particularités géologiques. Si le temps le permet et que la géologie de la région étudiée semble cacher d'autres secrets, un troisième balayage selon le dernier axe est parfois essentiel. Dans un cas où plusieurs orientations de structures géologiques sont présentes, un balayage avec un angle par rapport à l'un des trois axes peut être la seule solution envisageable. Dès le départ, l'utilisateur doit connaître l'orientation générale de la structure de son terrain et ainsi orienter son premier balayage dans le sens le plus opportun.

## 4.2 Création des contacts

Si les étapes précédentes ont bien été complétées, la génération de surfaces devrait se faire sans trop de problème; les problèmes surviennent normalement une fois les surfaces créées. Pour ne pas rendre ce manuel trop lourd, le modélisateur est appelé à consulter des guides à l'usage de gOcad pour produire des surfaces les plus fidèles possible des données disponibles. Il existe plusieurs méthodes dans gOcad pour rendre les surfaces le plus près de la réalité possible à l'aide de points et de nœuds de contrôle. Si le squelette des contacts est assez dense, les surfaces qui en résulteront ne nécessiteront qu'un minimum de retouche. Le paragraphe qui suit traitera des étapes suggérées pour en venir jusqu'à la modélisation de surfaces.

Premièrement, il est préférable d'afficher dans le *viewer* seulement les objets (*Curves* dans ce cas-ci) qui serviront à produire une surface. Une fois les objets bien en vue, on peut créer une première surface en suivant ce parcours-ci : Surface→New/From Curves/Several Curves. On doit aussitôt choisir les courbes que l'on désire modéliser en tenant le bouton Control enfoncé jusqu'à la dernière courbe, après lui avoir donné un nom. Il est suggéré d'embellir immédiatement cette surface en rendant les triangles équilatéraux (Surface→Tools/Beautify/Beautify Triangles for Equilaterality). Suite à cette opération, la trace des courbes du squelette devrait être plus ou moins visible (Fig.7). Comme pour les courbes, les surfaces sont entièrement modifiables, et ce de plusieurs façons différentes. Il s'agit, encore une fois, d'explorer les diverses options qui s'offrent à nous et de juger de la meilleure solution possible (Surfaces→Tools/Local...).

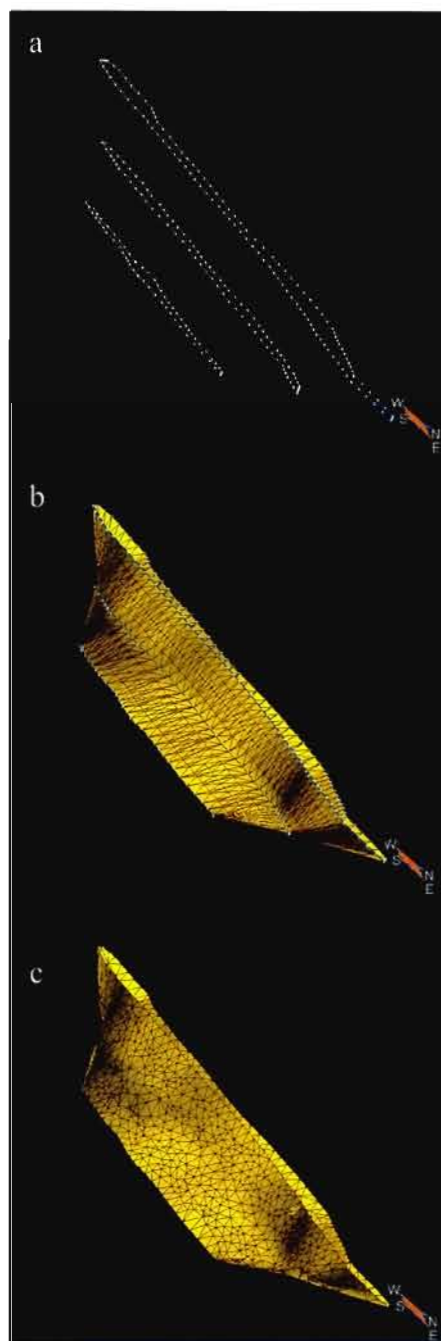


Figure 7 : (a) Courbes servant à la modélisation d'une surface; (b) Surface créée, à noter que tous les points passent par les courbes de (a); (c) Surface après la fonction *Beautify*, où les points ne passent plus forcément par les courbes de (a).

## 6.0 Conclusion

Ce guide se veut une série d'étape facilement réalisable par un néophyte de la modélisation tridimensionnel, sans nécessairement connaître la terminologie complexe qui s'y rattache. Il devient donc évident que ce guide n'est pas suffisant pour construire un modèle 3d complexe. Par contre, lorsque l'utilisateur aura complété avec succès ces étapes, il comprendra beaucoup mieux le fonctionnement de gOcad et il sera en mesure de déduire les démarches ou les applications à effectuer pour atteindre son but. Gocad est un logiciel qui s'apprend facilement si l'on veut bien l'explorer et tenter des expériences. La fonction d'importation d'objets permet de créer des projets sur mesure sans altérer les fichiers d'origine.

Quelques lectures sont recommandées pour approfondir les connaissances sur la modélisation géologique (Bédard, 2006) ou plus spécifiquement sur les fonctionnalités de gOcad (Mira Geoscience, 2006). Le menu d'aide de gOcad est aussi très complet et peut s'avérer fort utile.

**Références**

Bédard, K (2006). « La construction de modèles géologiques 3d à l'ère de la normalisation ». Mémoire de maîtrise, Québec, Université Laval, 141pp.

Mira Geoscience (2006). Introduction to Gocad for Mining, Mira Geoscience Limited, Montréal, Vol.1, 148pp.

## APPENDICE E

### FICHIERS NUMÉRIQUES – MODÈLE 3D SOUS GOCAD